

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.

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 метал-

ла, 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 преоб-

разователи, 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 структурой 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 вихретоковый 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 вза-

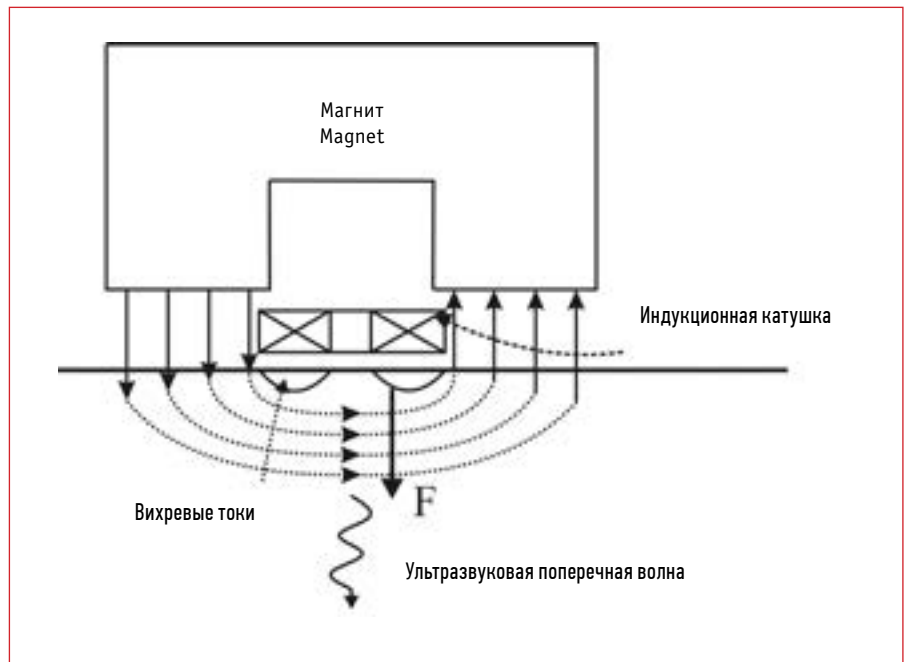


Рис. 1. Схема ЭМА-преобразователя для поперечных волн

имное 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].

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

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

Основные характеристики метода	Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод	Метод рассеяния (вытеснения) магнитного потока (MFL)	Метод измерения полей переменного тока (ACFM)
Объекты контроля	Металлические изделия и полуфабрикаты стальных труб, листового проката и других изделий из стали, а также алюминия и других металлов	Металлические ферромагнитные изделия, полуфабрикаты и сварные соединения	Трубы диаметром ≥ 4 мм и толщиной ≥ 1 мм
Типы обнаруживаемых дефектов	Поверхностные и подповерхностные питтинговые и плоскостные коррозионные повреждения, трещины, волосовины, заковы, закаты, включения, флокены	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	Метод ACFM позволяет обнаружить поверхностные и подповерхностные дефекты
Диапазон измерения	Диапазон измеряемых толщин: для стали – 1–60 мм; для алюминия – 0,7–100 мм	Диапазон толщины до 20 мм. Максимальная толщина покрытия – 6 мм	Поверхностные и подповерхностные дефекты
Зазор	До 4 мм	10 мм	–

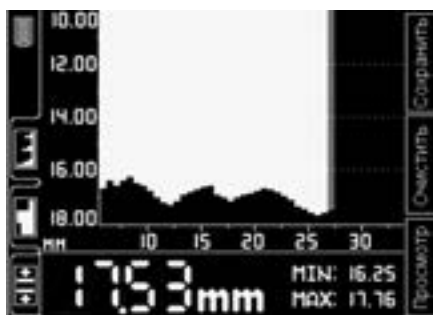


Рис. 2. В-скан контролируемой поверхности стенки ОК

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 Хол-

ла 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 преобразователем, 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 производитель-

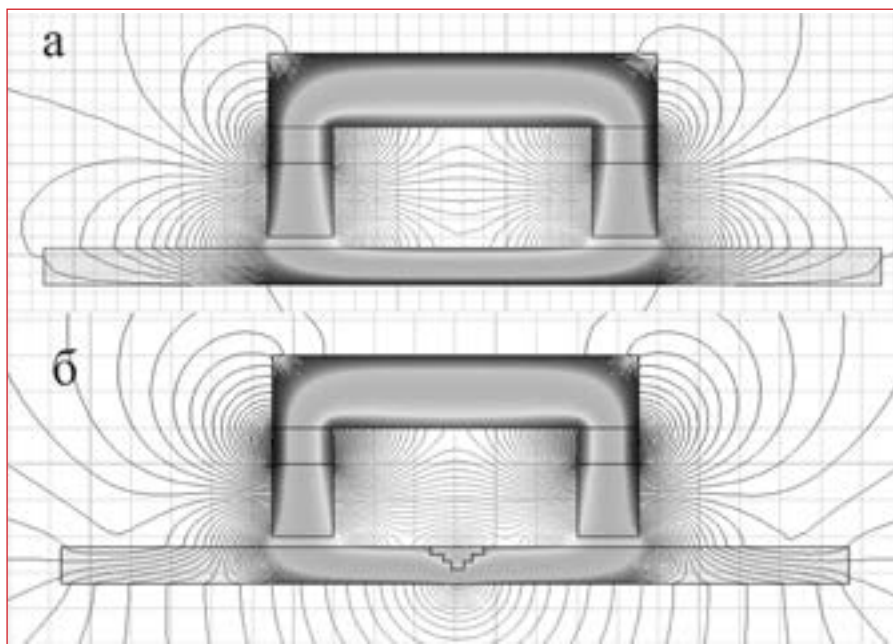


Рис. 3. Расчетная картина силовых линий магнитного поля на бездефектном участке стального листа (а) и линий магнитного поля рассеяния в районе искусственного дефекта (б)

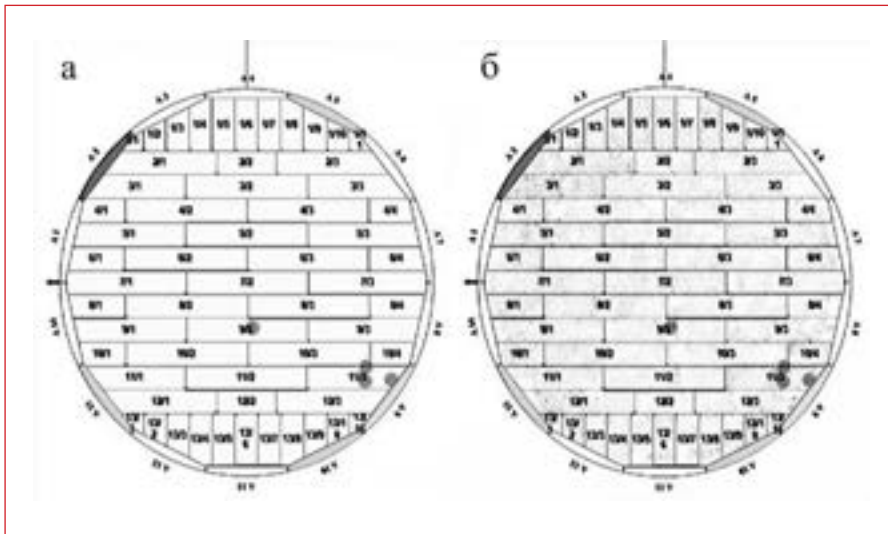


Рис. 4. Чертеж пола нефтехранилища (а) и его дефектограмма (б) с координатной привязкой

ность 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 вихре-

вых токов не влияет на результаты контроля. При расположении твердотельного чувствительного элемента параллельно 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 $\mu_{ст}$ при сканировании будет приводить к плавному изменению H_x и H_z . Для подавления влияния $H_x(\mu_{ст})$ и $H_z(\mu_{ст})$ 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 картины вихревых токов (рис. 5б) и картины результирующего магнитного поля [5].

В качестве информативного параметра преобразователя принято использовать амплитуды составляющих (проекций) B_z и B_x вектора магнитной индукции.

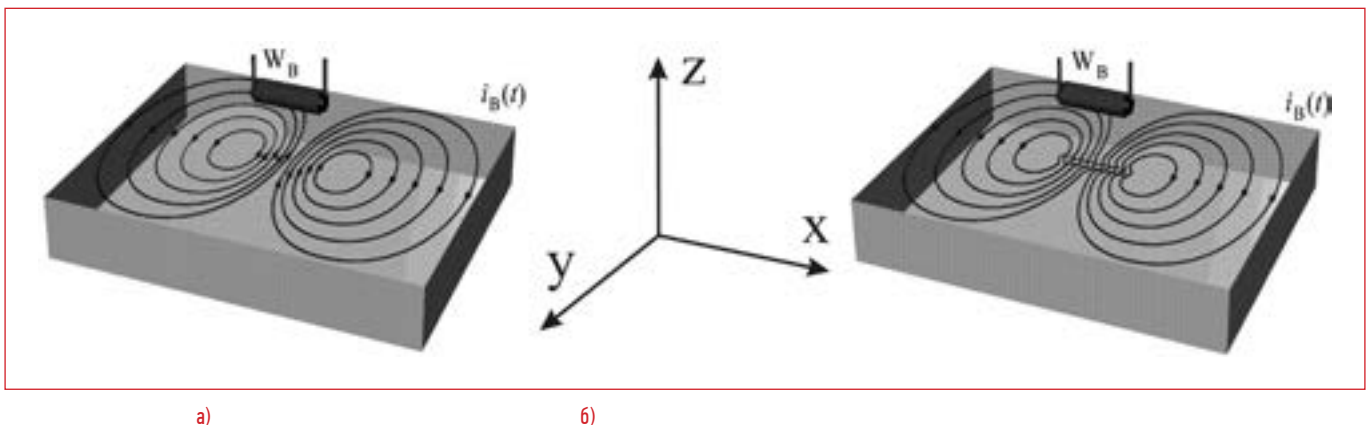


Рис. 5. Симметричная картина вихревых токов, возбуждаемых протяженной обмоткой в бездефектном объекте контроля (а), и ее искажение в районе линейного дефекта, направление которого совпадает с осью обмотки (б)

Таблица 2. Электромагнитно-акустический (ЭМА) метод

Технические характеристики	Электромагнитно-акустический толщиномер A1270	Толщиномер EM1301	мини-ЭМА-толщиномер EM2210	Портативный ЭМА-толщиномер NKD-019E
Функциональные возможности	<ul style="list-style-type: none"> • Проведение измерений без предварительной подготовки поверхности и без контактной жидкости 			
	<ul style="list-style-type: none"> • Измерение толщины металлических изделий через коррозионное и лакокрасочное покрытие толщиной до 1,5 мм • Малая апертура ЭМА-преобразователя (8 мм) позволяет проводить контроль труб малого диаметра (от 15 мм) 	<ul style="list-style-type: none"> • Возможность работы со сторами • Толщиномер имеет высокое соотношение сигнал/шум, благодаря чему повышена надежность работы при больших зазорах 	<ul style="list-style-type: none"> • Подключение планшета, смартфона или другого устройства • На показания прибора слабо влияет переко 	<ul style="list-style-type: none"> • Измерение параметров объектов экстремально высокой и очень низкой температурой поверхности • Измерения можно проводить через изоляционные покрытия • Шероховатая поверхность не создает препятствий для корректных измерений
Диапазон измеряемых толщин, мм	0,5–50	Для стали 1–60	Для стали 2–60	1,5–100
Диапазон частот преобразователя, МГц	2,5–5,0	3–5	3–5	4
Погрешность измерения остаточной толщины	$\pm(0,5\% + 0,01/0,1)$	$\pm 0,04$ мм	$\pm 0,04$ мм	$\pm 0,01$ мм
Диапазон зазора между датчиком и ОК, мм	До 2	До 3	До 2	До 4
Передача данных на ПК	Через USB	Через Wi-Fi или USB	Через USB	-

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

Технические характеристики	Silverwing Handscan MFL – мини-сканер плоских пластин	Silverwing MFLi3000 – промышленный сканер днищ резервуаров	Silverwing MFL 2000 – высокоскоростной сканер обнаружения коррозии днища резервуаров	Магнитный дефектоскоп MFL10
Функциональные возможности	<ul style="list-style-type: none"> • Постоянные магниты последнего поколения • Легкий блок электроники, работающий на отдельной батарее • Простое в использовании и экономичное средство проверки 	<ul style="list-style-type: none"> • Быстрый и экономичный контроль • Простая в использовании эргономичная конструкция • Система автоматического обнаружения дефектов • Быстрая и экономичная проверка • Простая в использовании эргономичная конструкция • Система автоматического обнаружения дефектов 		<ul style="list-style-type: none"> • Простота в эксплуатации. Например, при подключении по USB система определяет дефектоскоп как внешний накопитель информации • Практически мгновенная готовность системы к работе
	Диапазон измерения толщины, мм	До 15	До 20	
Детекторы, кол-во датчиков Холла	18	256	36	Датчики Холла
Скорость, м/с	0,5			0–5
Максимальная толщина покрытия, мм	6			2
Ширина сканирования, мм	150	300	300	180
Время непрерывной работы, ч	10	3	10	12
Диапазон рабочих температур, °C	–30...55			0...50

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 на-

блюдается «разрыв» линий электрического поля. Напряженность электрического поля уменьшается в центре дефекта и увеличивается вблизи его краев. Вихревой ток будет огибать дефект по краям.

Вследствие этого при перемещении точки наблюдения вдоль дефекта к его середине наблюдается уменьшение составляющей B_x . Это уменьшение пропорционально глубине дефекта, а минимальное

Таблица 4. Метод измерения полей переменного тока (ACFM)

Технические характеристики	Система неразрушающего контроля сварных швов ACFM Amigo	Подводная система неразрушающего контроля сварных швов ACFM U31-D
Функциональные возможности	<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 • Резкие изменения проницаемости или проводимости (например, в сварном шве) очень мало влияют на датчиков, поскольку направление тока можно сделать нормальным к поверхности раздела • 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 	
Массив сенсоров	16 каналов (8 пар сенсоров) плюс кодировщик данных	
Диапазон измерения толщины, мм	До 15	До 10
Максимальная толщина покрытия, мм	До 10	До 5
Время непрерывной работы, ч	10	6
Диапазон рабочих температур, °C	-20...40	

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 недостаточной проработкой методической и нормативно-технической базы. В частности, отсутствуют стандарты на сам метод ACFM 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 повреждений. 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 использованием ЭМА-преобразователей оптимально проводить локальный оперативный контроль остаточной толщины стенок изделия в районе сварных швов. На основе 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 вихревом контроле резьбы с использованием тангенциальных преобразователей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 9. С. 58-64.