



Контроль состояния объектов минерально-сырьевого и нефтегазового комплексов с использованием метода рассеяния магнитного потока

В статье представлен обзор современного состояния метода рассеяния магнитного потока [magnetic flux leakage – MFL], а также рассмотрены особенности его применения для неразрушающего контроля объектов минерально-сырьевого и нефтегазового комплексов. Описаны приборы и системы ведущих фирм-производителей, а также предложена классификация объектов контроля, видов выявляемых дефектов и способов эксплуатации.

Submitted 19.07.19
 Accepted 12.08.19

A. Yu. Vasilev¹

Condition Monitoring of Objects of the Mineral and Oil and Gas Complexes Using Magnetic Flux Leakage Method

The article presents an overview of the current state of the magnetic flux leakage testing, and also describes the features of its application for non-destructive testing of objects of the mineral, oil and gas industry. The devices and systems of leading manufacturers are described, a classification for objects, types of defects and methods of operation is proposed.

Keywords: nondestructive testing, magnetic flux leakage, magnetic measurements, devices

Введение

Абсолютное большинство стационарного и мобильного оборудования добывающей промышленности в настоящее время изготавливается из стали со всеми присущими проблемами производства и эксплуатации в сложных условиях. Вопросы НК и мониторинга состояния объектов в нефтегазовом и минерально-сырьевом секторах промышленности являются важными для обеспечения безаварийности производств, чья суммарная доля составляет почти треть доходов бюджета РФ [1].

Объекты контроля в минерально-сырьевом и нефтегазовом комплексах промышленности

На предприятиях минерально-сырьевого и нефтегазового комплексов большое количество различных объектов, основные крупногабаритные конструкционные элементы которых изготавливаются из стального металлопроката, который условно можно разделить на следующие группы:

1. сортовой металлопрокат;
2. фасонный металлопрокат;
3. трубы;
4. листовой металлопрокат.

Предлагаемое разделение охватывает большинство конструкционных

элементов в представленных отраслях: стрелы кранов и экскаваторов, трубопроводы, корпуса машин и резервуаров, стальные канаты и прочее. По данным Ростехнадзора анализ результатов технических расследований аварий показывает, что основными причинами явились: внутренние опасные факторы, связанные с разгерметизацией и разрушением технических устройств (причина 10 аварий, или 52,6% от общего числа аварий); ошибки персонала, связанные с нарушением требований организации и производства газоопасных, огневых и ремонтных видов работ, а также организации работ по обслуживанию оборудования (причина 9 аварий, или 47,4%). Аварии, причиной которых явились разгерметизация и разрушение технических устройств, произошли в ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим», ПАО АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфимский НПЗ» (2 аварии), АО «Отраденский ГПЗ», ООО «Газпром переработка» Завод по стабилизации газового конденсата, ООО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез», АО «Сибур-Химпром», АО «Новокуйбышевский нефтеперерабатывающий завод», АО «Куйбышевский нефтеперерабатывающий завод», АО «Краснодарский НПЗ-Краснодарэконефть». Наиболее крупная по эко-

номическому ущербу авария произошла 20 января 2017 г. в филиале ПАО «АНК «Башнефть» «Башнефть-Уфанефтехим» на установке висбрекинга топливного производства. Технической причиной аварии явилось разрушение прямолинейного участка трубопровода от колонны к насосу из-за утонения его стенки в результате коррозионного износа и несоответствия материального исполнения трубопровода проекту при проведении ремонтных работ по его замене. При этом произошел выброс гудрона с последующим его возгоранием. При пожаре были повреждены и деформированы площадки обслуживания, опорные элементы металлоконструкций, кабельные линии, крановые пути и подъёмные сооружения в помещениях насосных, деформированы участки трубопроводов, смонтированных на эстакаде. Экономический ущерб от аварии составил 220 млн руб. [3].

Несмотря на предпринимаемые меры защиты, в том числе от воздействия климатических и антропогенных факторов, влияние механических нагрузок, работа в агрессивной окружающей среде (перепады температур, влажность, агрессивная среда) могут вызывать возникновение новых дефектов и развитие производственных дефектов

**ВАСИЛЬЕВ
 Алексей Юрьевич**

Инженер-конструктор
 ООО «Константа»,
 аспирант ФГУП ВНИИМ
 им. Д. И. Менделеева,
 Санкт-Петербург



в процессе эксплуатации, а при нарушениях технологий изготовления — на стадии производства.

Теоретические основы НК методом MFL

В основе метода MFL лежит намагничивание стенки объекта контроля (ОК) внешним магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом или электромагнитом различного исполнения. При использовании данного метода чаще всего используется П-образные системы намагничивания (рис. 1). Магнитный поток, создаваемый, например, постоянным редкоземельным (Nd-Fe-B) магнитом, пронизывает стенку ОК и замыкается магнитным мостом, создавая контур.

Создание в объёме стенки ферромагнитного изделия магнитного поля с индукцией порядка $1,6 \pm 2,0$ Тл приводит к тому, что снаружи на границах раздела полюс магнита — воздушный промежуток — сталь магнитные силовые линии направлены практически перпендикулярно к поверхностям, в то время как в объёме стенки изделия они стремятся проходить практически параллельно поверхностям, что обеспечивает минимальное сопротивление магнитной цепи и намагничивание близкое к насыщению. При определённых соотношениях толщины T стенки изделия и размеров магнита практически все силовые линии магнитного потока будут проходить внутри металла, лишь незначительная часть из них выйдет наружу (рис. 1а). В случае, если на одной из поверхностей стенки будет участок с локальным утонением (например, питтинговой или другой коррозией), то произойдёт изменение картины магнитного поля (рис. 1б). Плотность силовых линий в районе дефекта возрастёт, объём металла войдёт в магнитное насыщение, и часть магнитных силовых линий выйдет из листа как со стороны установки

магнита, так и с противоположной стороны (произойдёт рассеяние магнитного потока), что может быть зафиксировано путём измерения нормальной составляющей напряжённости магнитного поля H_z или магнитного потока Φ_z , пронизывающего чувствительный элемент площадью S :

$$\Phi_z = \oint B_z dS = \oint \mu H_z dS, \quad (1)$$

где B_z и H_z — нормальные составляющие магнитной индукции и напряжённости магнитного поля в точке измерения, располагаемой симметрично между полюсами магнита; μ — магнитная проницаемость [2].

В большинстве случаев в качестве чувствительных элементов используются преобразователи Холла, анализирующие изменение нормальной составляющей B_z магнитной индукции в точке наблюдения.

Основными мешающими параметрами при контроле с использованием метода MFL являются:

1. вихревые токи, возникающие при сканировании поверхности магнитом;
2. вариация магнитной проницаемости μ материала ОК по поверхности;
3. шероховатость и волнистость поверхности ОК;
4. неравномерность толщины покрытия при его наличии.

Магнитное поле вихревых токов является функцией скорости v перемещения магнита (каретки), и при типичном сканировании его изменение обусловлено тремя этапами: ускорение, движение с постоянной скоростью и торможение. При расположении твердотельного чувствительного элемента перпендикулярно поверхности ОК магнитное поле вихревых токов влияет на результаты контроля и может вызвать погрешность при измерениях. Применение цифрового или аналогового фильтра высоких частот с подходящей частотой среза позволяет подавить влияние вихревых

токов на этапах ускорения и движения с постоянной скоростью.

Изменение μ при сканировании будет приводить к плавному изменению H_x и H_z . Для подавления влияния H_x (μ) и H_z (μ) на результаты контроля следует применить цифровой фильтр низких частот с соответствующим образом подобранной частотой среза, определяемой v .

Шероховатость, волнистость на поверхности ОК, неравномерность толщины покрытия вызывает непостоянность расстояния между полюсами магнита и металлом, а также между чувствительным элементом и металлом, что влечёт за собой необходимость ввода поправочных коэффициентов, оценить которые можно, предварительно проведя серию измерений толщины покрытия при различной шероховатости металла [2].

До последнего времени метод MFL рассматривался как качественный (индикаторный), позволяющий обнаруживать дефект, характеризующийся утонением стенки без предоставления информации о его характеристиках (дефектоскопы ручные компании Silverwing NDT). Однако в последнее время ряд фирм предприняли усилия по разработке нового поколения измерительных преобразователей и алгоритмов обработки измерительной информации, что позволило количественно оценить параметры коррозионных повреждений (фирма MFE Enterprises): глубину дефекта; его форму и площадь.

Интерпретация сигналов с чувствительного элемента при проведении контроля требует осторожности и внимания, т. к. в ряде случаев полученный сигнал от разных дефектов может быть практически идентичен (рис. 2). Несмотря на то, что параметры дефектов различаются, можно сделать ложное предположение при анализе результатов контроля об однотипности данных дефектов. Это связано с тем, что магнитная индукция уменьшается с увеличением расстояния

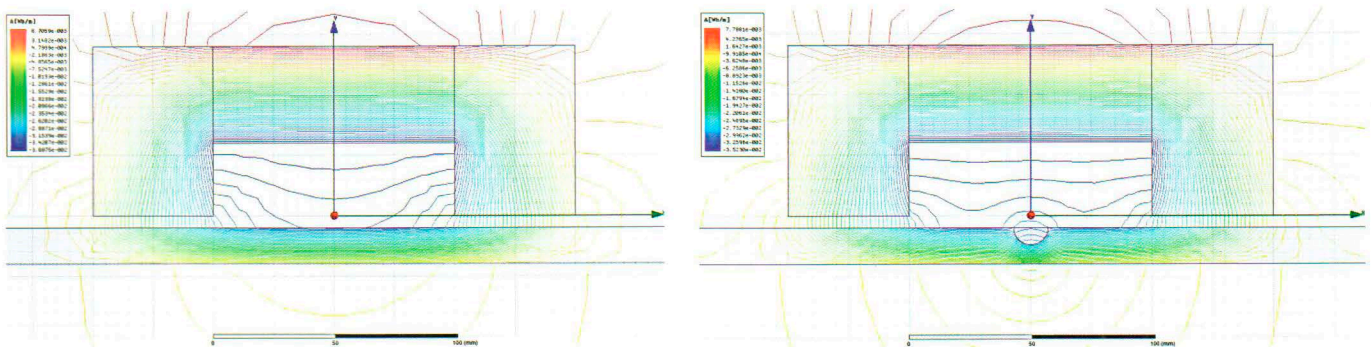


Рис. 1. Картина магнитного поля в магнитной системе, состоящей из постоянного магнита, магнитных полюсов и ОК без дефекта (а) и с дефектом (б)

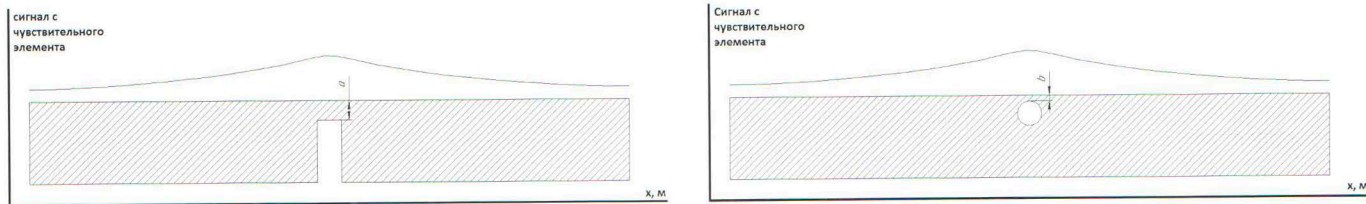


Рис. 2. Сигнал чувствительного элемента над моделями различных дефектов: а — коррозионного типа с утонением стенки более 50% толщины; б — типа пузыря у самой поверхности стенки ОК

от магнита, и силовые линии, находящиеся ближе к поверхности, дают тот же сигнал с выхода чувствительного элемента что и вытесненные силовые линии от дефекта, находящегося глубже, но показывают больший процент утонения металла. Данную проблему можно частично решить применением калибровочных (контрольных) образцов.

Выполненные ведущими производителями эксперименты показали, что использование искусственных дефектов ступенчатой конической формы с углом 136° и глубиной от $0,2T$ до $0,8T$ (где T — толщина стенки ОК) для калибровки и настройки оборудования позволяет измерять геометрические параметры реальных питтинговых дефектов с погрешностью не более $\pm 10\%$ в сравнении с результатами ультразвуковых измерений остаточной толщины металла.

Типы дефектов, выявляемые методом MFL

Основными типами дефектов металлопроката, возникающими как в процессе эксплуатации, так и на стадии производства оборудования вследствие нарушения технологических процессов являются следующие (рис. 3):

- пузырь — вздутие в виде локализованного вспучивания металла с последующим его прикатыванием и часто с разрывом по контуру;
- плена — отслоение металла языкообразной или неправильной формы, соединённое с основным металлом одной стороной, явившееся следствием раскатки дефекта сляба или следов его грубой зачистки; образуется вследствие раскатки или расковки

рванин, подрезов, следов глубокой зачистки дефектов или сильной обработки валков;

- раскатанная трещина — разрыв металла, образовавшийся при раскатке трещины литой заготовки;
- отпечатки в виде выступов или углублений, одиночных или периодически повторяющихся по длине листа; образуются в результате прокатки или правки листа при дефекте валков или налипания на них инородных частиц;
- пузыри — полости в теле изделия, возникающие в результате выделения газов при кристаллизации;
- расслоения, ориентированные вдоль направления деформации и проявляющиеся в изломе в виде трещин; образуются вследствие раскатки при деформации усадочных раковин, рыхлости, газовых пузырей, неметаллических и металлических включений, имевшихся в слитке, которые служат очагами зарождения несплошности в прокате;
- трещины, возникающие вследствие усталости металла в местах концентраций напряжений;
- коррозионные повреждения, возникающие из-за воздействия внешней среды и переменных нагрузок; следует отметить, что дефекты коррозии необходимо выявлять в начальной стадии их развития.

Современное оборудование, реализующее метод MFL

На сегодняшний день оборудование, реализующее метод MFL, представлено в большом количестве вариаций для решения различных задач НК. Метод MFL

может быть как единственным методом НК, так и входить в комплекс методов (например, внутритрубные снаряды для контроля состояния стенок труб, реализующие несколько методов, но чаще всего MFL и ультразвуковой контроль).

Все оборудование можно разделить на несколько групп по типу исполнения:

1. ручные дефектоскопы;
2. механизированные дефектоскопы тележечного типа;
3. автоматизированные стационарные системы сканирования;
4. автоматизированные внутритрубные снаряды.

И по объектам контроля:

1. листовой металлопрокат;
2. стальные канаты;
3. трубы из ферромагнитных материалов;
4. металлопрокат различного профиля на производстве;
5. магистральные трубопроводы.

Для контроля состояния стенок труб небольшого диаметра — ручные адаптивные многоканальные сканеры-дефектоскопы, отличающиеся простотой и мобильностью, для контроля протяжённых участков трубных систем под защитными покрытиями в целях оперативного мониторинга состояния стенок труб. Основные фирмы производители ручных дефектоскопов: Silverwing NDT, MFE Enterprises, Виматек (рис. 4–7). В результате работ мы можем получить информацию о наличии дефектов индикацией или картой дефектов на объекте (рис. 8, 9).



Рис. 4. Дефектоскоп для контроля стенок труб PipeScan от компании SilverWingNDT

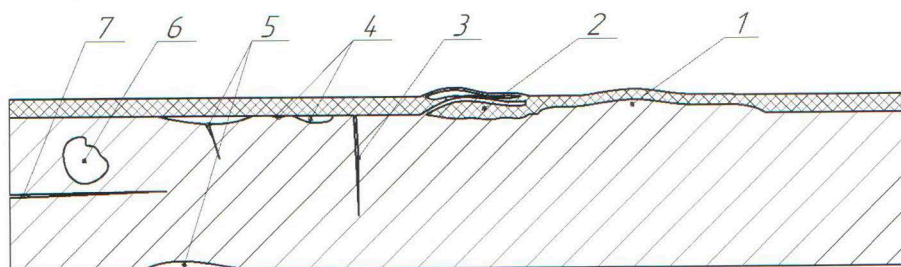


Рис. 3. Участок ОК с различными типами дефектов: 1 — пузырь; 2 — плена; 3 — трещина; 4 — отпечатки; 5 — коррозионные повреждения; 6 — пузырь; 7 — расслоение

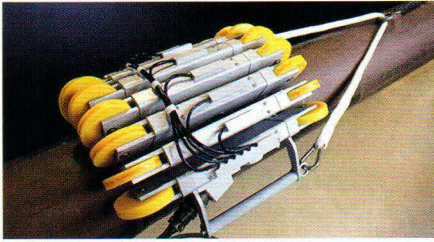


Рис. 5. Дефектоскоп стенок труб от компании MFEEnterprises



Рис. 6. Дефектоскоп Магпортатур от компании Виматек (вид сбоку)

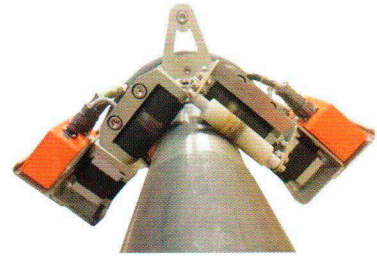


Рис. 7. Дефектоскоп Магпортатур от компании Виматек (вид сзади)

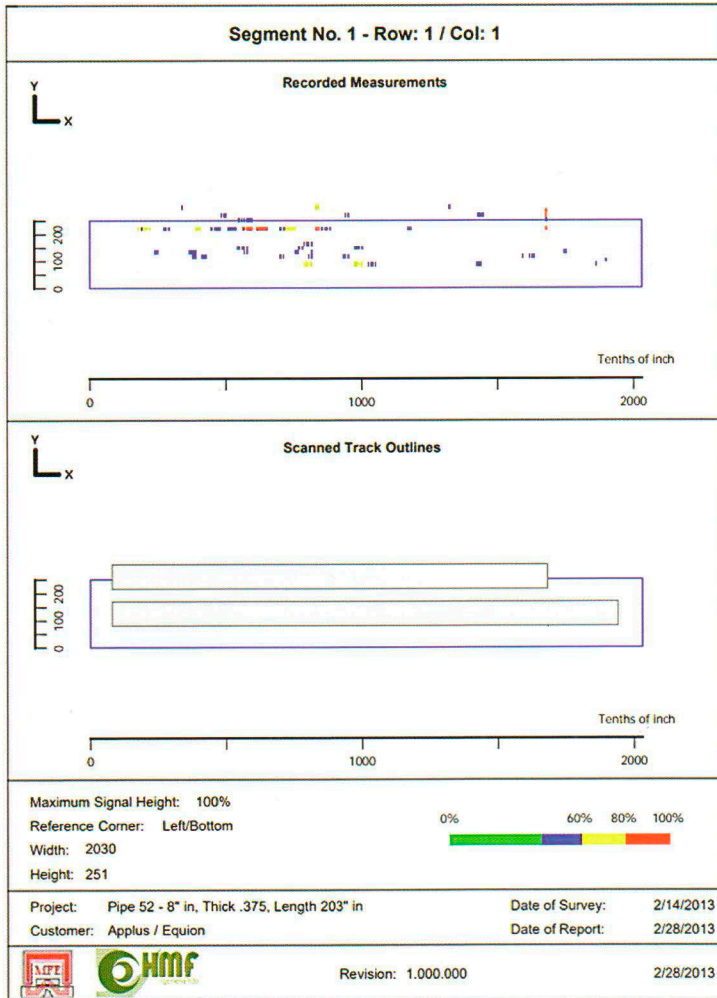


Рис. 8. Пример отчета с картой дефектов, полученный в результате проведения контроля трубы дефектоскопом Pipescan от MFEEnterprises

Отчет по трубе № 3.

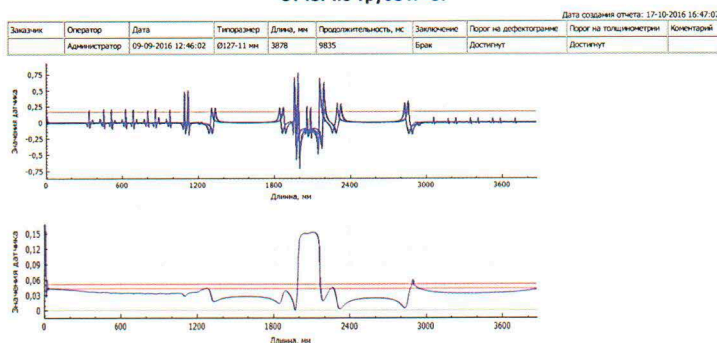


Рис. 9. Пример отчета с представлением результата контроля Магпортатур

Для контроля стенок и дна резервуаров (листового металлопроката) требуется определенная конфигурация ручных или имеющих управляемый электропривод дефектоскопов по типу «тележка», упрощающая работу в условиях больших площадей объекта (рис. 10–12). На рынке данные дефектоскопы представлены компаниями SilverWingNDT, MFE Enterprises, Интрон.



Рис. 10. Дефектоскоп листового металлопроката на технологии MFLИнтронорк M-150 от компании ИНТРОН+



Рис. 11. Ручной дефектоскоп для контроля плоских поверхностей Handscan от компании SilverwingNDT

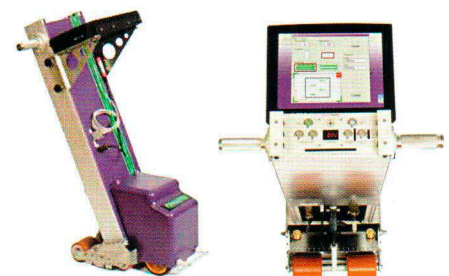


Рис. 12. Моторизованный дефектоскоп Floormap3D от компании Silverwing NDT для контроля листового металлопроката

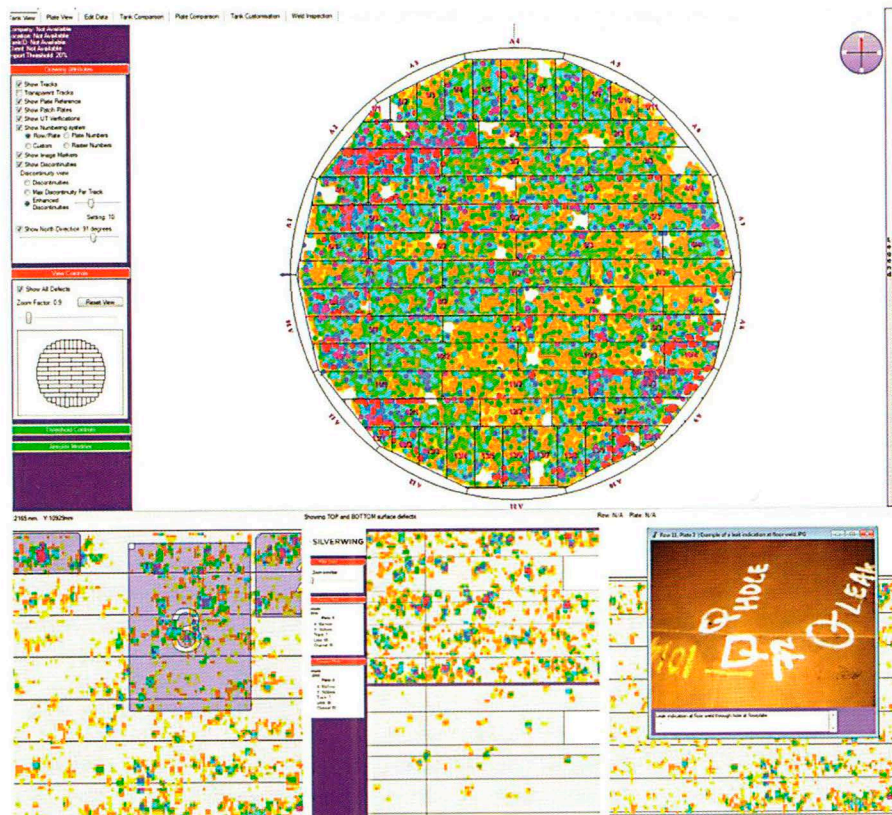


Рис. 13. Интерфейс программы Silverwing Inspection Mapping Software с картой дефектов и их фотографией

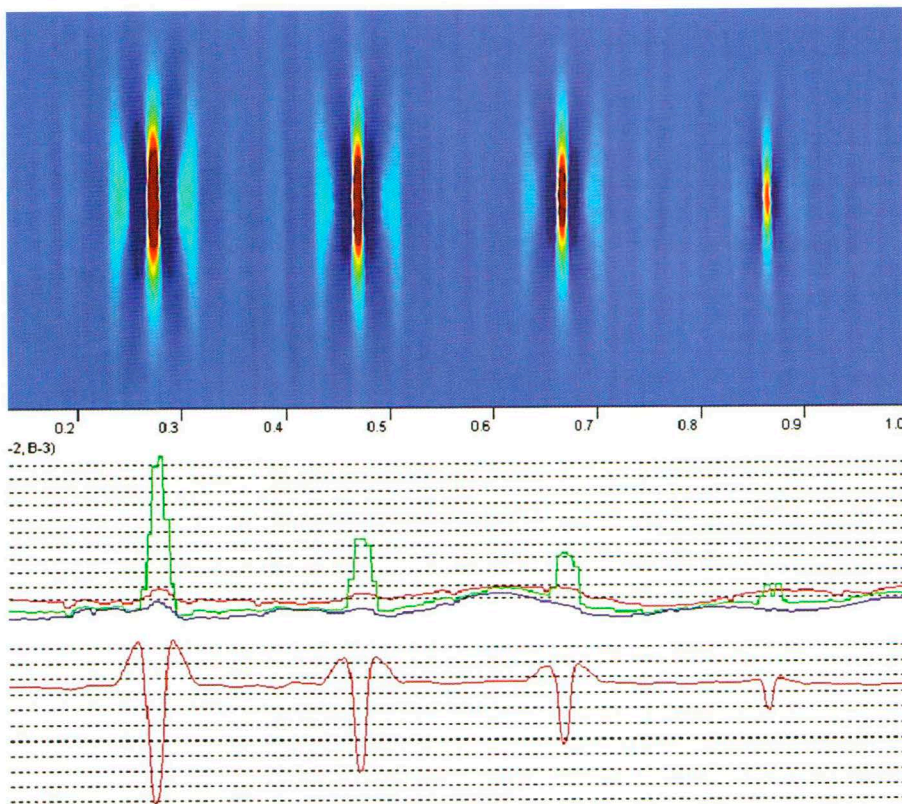


Рис. 14. Схематическое отображение дефектов на листе по результатам сканирования дефектоскопом Интронор М-150

Как и в случае ручных дефектоскопов, по итогу работ мы получаем информацию о дефекте индикацией или картой дефектов, построенной в специализированном ПО (рис. 13, 14).



Рису. 15. Дефектоскоп стальных канатов ИНТРОС



Рис. 16. Контроль канатов с помощью технологии MFL дефектоскопом Интрос-авто

Для контроля целостности стальных канатов компания Интрон предлагает дефектоскопы Интрос и Интрос-авто (рис. 15, 16). Компанией ИНТРОН разработано собственное ПО, позволяющее создавать отчёт с результатами работ (рис. 17) (в случае работы дефектоскопом Интрос) или получать информацию в реальном времени (в случае работы дефектоскопом Интрос-авто).

Контроль магистральных трубопроводов осуществляется внутритрубными сканирующими автоматизированными многоканальными системами тип PIG (рис. 18, 19). Производят данные дефектоскопы такие компании, как Pipeway, Транснефть-Диаскан, RosenGroup, EnduroPipelineServices, T. D. Williamson. Данные могут получаться как в реальном времени, так и сниматься с оборудования после выполнения работы.

ИНТРОС

Отчет по дефектоскопии каната

Обследование № 7

Дата контроля : 24.06.2003 9:37

Файл : D:\ЛАБОРАТОРИЯ НК\Сайт\Норильск_сайт.slb

Объект : Шахта

ОАО "Норильский Никель", "МК5х4" ЮГ.

Диаметр 43.5 мм

№ 1

Тип : DIN 21254

р-к "ОКтябрьский" СС-1

Канат

Полная длина 1071 м Дата установки 05.06.2002

Шаг свивки 250 мм Последний контроль 17.06.2003

Прибор

Электронный блок : ЭБ 2/16МВ памяти

№ 303041 версия 4.21

Магнитная головка : МГ 24-64

№ 4007

Участок установки нуля ПС: образец №1

Участок калибровки ПС: образец №1 11.3 %

Калибровка ЛД: образец №1 15.0мВ = 1.0 %

Условия

Скорость: 1.0 м/с

Ориентация магнитной головки: на 26 отметке.

Двигается: Объект контроля

Направление движения: прямое

Расположение магнитной головки: Вертикальное.

Результат

Проконтролирован участок длиной 7.98 м от 57.86 м

Максимум ПС 8.17 % на 62.04 м

Минимум ПС 1.24 % на 59.57 м

Максимальный сигнал ЛД 1.9 на 62.11 м (порог 49мВ)

Шум ЛД 10.8мВ

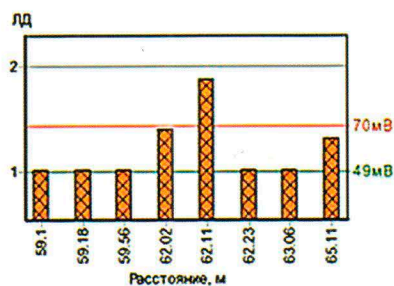
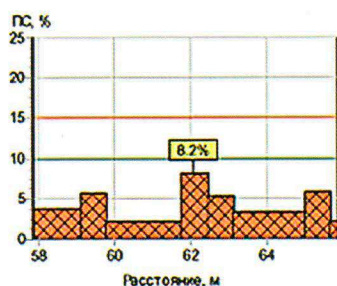


Рис. 17. Пример отчёта по результатам работы дефектоскопа ИНТРОС

Выходной контроль металлопроката. Оборудование для выходного контроля производят компании Виматек, Уран-НДТ, PRÜFTECHNIK (рис. 20, 21). В основном, данные передаются на пульт оператору и отображаются в реальном времени.

Вывод

Современное оборудование на базе метода MFL можно применять для экспресс-выявления коррозионных повреждений стенки металлических изделий, изготовленных из металлопроката, повреждений профильного металлопроката при выходном контроле или в процессе эксплуатации. Однако из-за недо-

статков метрологического обеспечения данный метод в большинстве случаев должен применяться при обеспечении комплексного контроля в совокупности с другими методами НК (например, с ультразвуковым эхо-методом, радиографическим контролем), позволяя выявлять предварительно предполагаемые участки с дефектами с высокой степенью достоверности и удешевляя работы более точными, но менее производительными методами.

Создание современных методов обработки данных, получаемые с первичных преобразователей, позволят решить проблемы неоднозначности интерпретации, а разработка метрологи-



Рис. 18. Комплексное многоканальное устройство внутритрубной диагностики от Enduro Canada Pipeline Services, Inc.

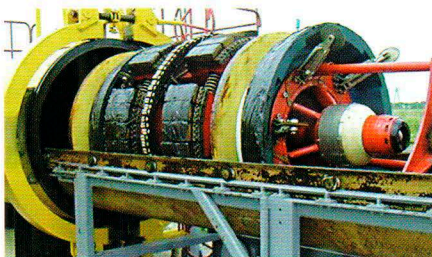


Рис. 19. Внутритрубный комплекс инспекции магистральных трубопроводов RocrorMFL-Aservice от Rosen



Рис. 20. Комплексное многоканальное устройство стационарной установки металлопроката различного сечения компании УРАН-НДТ



Рис. 21. Автоматизированный комплекс контроля труб ОМНИСКОП компании Виматек

ческого обеспечения позволят получать результаты контроля методом MFL с высокой степенью достоверности.

Литература

1. Министерство финансов Российской Федерации. Ежегодная информация об исполнении федерального бюджета. — М: [б.н.], 2018.
2. Потапов А. И., Сясько В. А., Соломенчук П. В. и др. Метод рассеяния магнитного потока. Magnetic Flux Leakage (MFL). В кн.: Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Электромагнитные и магнитные методы дефектоскопии и контроля свойств материалов. — СПб: Нестор-История, 2015. Т. II.
3. Ростехнадзор. Годовой отчёт о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 году. — М: [б.н.], 2018.

Статья получена 19 июля 2019 г., в окончательной редакции — 12 августа