

Высокопроизводительный контроль твердости на трубах с гладкостным покрытием

А.Г. Ефимов

д.т.н., заведующий отделом¹
efimov@nio12.ru

А.Е. Шубочкин

д.т.н., заведующий сектором¹
aeshubochkin@mail.ru

Е.В. Мартьянов

аспирант, м.н.с. НИО-12¹

П.Н. Мефодичев

магистрант, инженер НИО-12¹

¹ЗАО «НИИИИ МНПО «СПЕКТР», Москва, Россия

Рассмотрена проблема неразрушающего контроля качества металлопроката. Проведено сравнение вихретокового метода неразрушающего контроля с традиционно используемыми при производстве металлопроката рентгеновским и ультразвуковым методами. Дано описание разработанной для контроля автоматизированной линии.

Материалы и методы

Трубы большого диаметра исследовались вихретоковым и магнитным методами.

Ключевые слова

неразрушающий контроль, вихретоковый контроль, вихретоковая дефектоскопия, локальные упрочнения, контроль твердости, микротрещины, контроль сварного шва, контроль тела трубы

В процессе производства металлопроката широко применяются различные методы неразрушающего контроля (НК) [1]. При контроле труб диаметром до 220 мм важное место занимает вихретоковый метод НК, поскольку, он имеет ряд неоспоримых преимуществ: бесконтактность, высокая чувствительность и скорость контроля, возможность контролировать изделия с высокой температурой поверхности, низкие требования к качеству подготовки поверхности [2]. В то же время, вихретоковый метод имеет ряд существенных недостатков: выявление только поверхностных и подповерхностных дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов, трудности с определением геометрических параметров обнаруженных дефектов, значительное влияние на результаты контроля разброса электромагнитных свойств объекта контроля (ОК) [3–5]. Последний недостаток можно устранить за счет применения подмагничивания ОК до состояния насыщения [6].

Исходя из вышеизложенного, при контроле труб большого диаметра (ТБД) на производстве чаще всего используют ультразвуковой и рентгеновский методы, основным преимуществом которых перед вихретоковым является возможность выявления внутренних дефектов. Для контроля торцов труб также часто применяется магнитопорошковый метод, обладающий высокой чувствительностью и позволяющий легко визуализировать дефекты. Однако опыт последних лет показал, что существует ряд производственных дефектов металлургии, которые могут быть выявлены только с использованием вихретокового метода НК [7]. При производстве сляба могут происходить нарушения технологического процесса, которые приводят к образованию на его поверхности зон с повышенным содержанием углерода. В дальнейшем, при раскатке сляба в лист (рис. 1), эти зоны превращаются в пятна локальной поверхностной неоднородности, имеющие большую твердость, чем основной металл листа.

В процессе изготовления трубы (особенно толстостенной) лист подвергается значительным деформациям (рис.2), как следствие, в зонах с повышенной твердостью образуются микротрещины, проникающие на всю глубинную упрочненного слоя. Исходя из практического опыта, глубина этих трещин редко превышает 0,2–0,3 мм, при этом площадь такой зоны может не превышать несколько десятков мм. Учитывая шероховатость и состояние поверхности трубы, данные трещины не могут быть выявлены рентгеновским или ультразвуковым методом. Магнитопорошkovому контролю подлежат только торцы труб, поэтому указанные зоны растрескивания не выявляются при проведении традиционного выходного контроля качества. Зоны локального упрочнения поверхностного слоя металла этими методами также не обнаруживаются. После покрытия труб изоляционными или защитными покрытиями обнаружить указанные дефекты любым методом кроме вихретокового не представляется возможным и, в итоге, дефектные трубы отгружаются потребителю. В процессе эксплуатации происходит дальнейшее развитие микротрещин, что приводит к разрушению трубы задолго до расчетного срока эксплуатации изделия. Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что контроль твердости необходимо проводить не только в отдельных точках нескольких образцов партии, как это делается сейчас, а всей поверхности листов или готовых труб.

На сегодняшний день применяются несколько методов измерения и контроля твердости. Среди них наибольшее распространение получили контактные методы измерения твердости. Выбор метода измерения твердости металлов обусловлен механическими свойствами металлов и конструктивно-технологическими особенностями изделий. Существует несколько способов измерения твердости, различающихся по характеру воздействия наконечника. Твердость можно измерять вдавливанием индентора



Рис. 1 — Сляб на участке раскатки

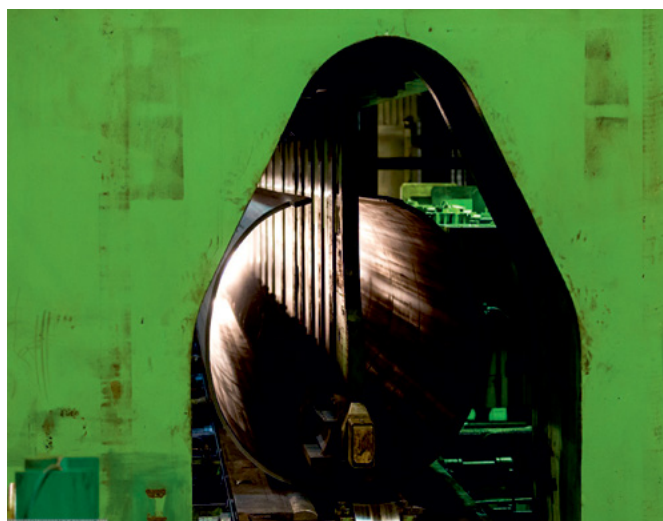


Рис. 2 — Формовка трубы большого диаметра

(способ вдавливания), ударом или же по отскоку наконечника — шарика. Твердость, определенная царапаньем, характеризует сопротивление разрушению, по отскоку — упругие свойства, вдавливанием — сопротивление пластической деформации. Перспективным и высокоточным методом является метод непрерывного вдавливания, при котором записывается диаграмма перемещения, возникающего при внедрении индентора, с одновременной регистрацией усилий. В зависимости от скорости приложения нагрузки на индентор твердость различают статическую (нагрузка прикладывается плавно) и динамическую (нагрузка прикладывается ударом). При контактно-импедансном (ультразвуковом) методе контроля твердость определяется по изменению частоты колебаний индентора датчика, при его внедрении в контролирующую поверхность. Для периодической проверки показаний твердомера, в комплекте с твердомером могут поставляться контрольные образцы (эталонные меры твердости), которые производятся по определенным шкалам твердости (Роквелл, Бринелль, Виккерс).

Перечисленные методы не лишены и целого ряда недостатков, ограничивающих их применение. Прежде всего, речь идет об их трудоемкости, делающей невозможным контроль всей поверхности объектов. Ни один из них также не может быть применен для контроля металла с защитными или изоляционными покрытиями.

Перед специалистами ЗАО «НИИИН МНПО «СПЕКТР» была поставлена задача обнаружения зон локального упрочнения на теле ТБД, в том числе через защитные и изоляционные покрытия толщиной до 10 мм. В данной статье приведены основные результаты экспериментальных исследований и дано описание разработанного оборудования.

Экспериментальные исследования

На первом этапе было проведено экспериментальное исследование образца с естественными дефектами (рис. 3) (палетта, вырезанная из одношовной трубы, изготовленной из стали марки X65 (API 5L), диаметр — 813 мм, толщина стенки — 39 мм, класс прочности — K60). Данный образец был вырезан из трубы, успешно прошедшей линию контроля качества, дефекты были обнаружены визуально перед нанесением защитного покрытия. В качестве испытательного оборудования был использован дефектоскоп ВД-90НП с преобразователем Тип-2 (диаметр катушки — 5 мм, частота возбуждения — 50 кГц). Целью экспериментальных исследований являлась оценка возможности выявления зоны повышенной твердости и определение ее границ. Во время исследований контроль проводился как непосредственно на поверхности образца, так и через максимально возможный рабочий зазор вихретокового преобразователя (ВТП), обусловленный нанесением защитных покрытий.

На рис. 4 приведено графическое представление выходного сигнала дефектоскопа ВД-90НП. Зоны, обозначенные красным цветом, соответствуют изменению структуры металла в зоне термического влияния, образовавшейся при вырезке палетты газовой сваркой. Синий цвет соответствует основному металлу трубы (твердость 200–230 НВ), зеленым цветом обозначена зона локального упрочнения (280–300 НВ). Полученные результаты были подтверждены замерами с использованием динамического твердомера Элит-2Д.

На втором этапе было исследовано влияние величины рабочего зазора на приращение сигнала вихретокового дефектоскопа, вызванное локальным увеличением твердости. Рабочий зазор изменялся в пределах от 0 до 7 мм. Показания снимались в точке «А» (зона локального упрочнения в которой сигнал дефектоскопа был максимален) относительно точки «О» (зона компенсации, соответствующая нулевому сигналу дефектоскопа). Полученные данные приведены на рис. 5.

На третьем этапе имитировался процесс контроля поверхности трубы в производственных условиях. Было произведено сканирование поверхности образца по линии А-Б (рис. 6), пересекающей зону локального упрочнения и существующий реальный дефект. На рис. 6 показана траектория сканирования, сигнал на экране дефектоскопа. В левом нижнем углу палетты

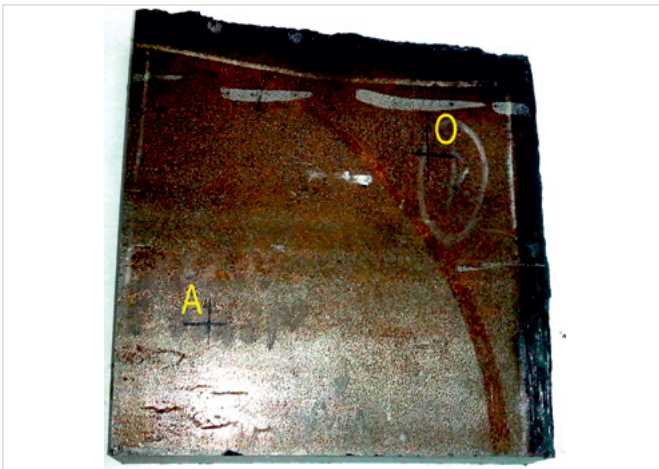


Рис. 3 — Палетта с зоной локального упрочнения

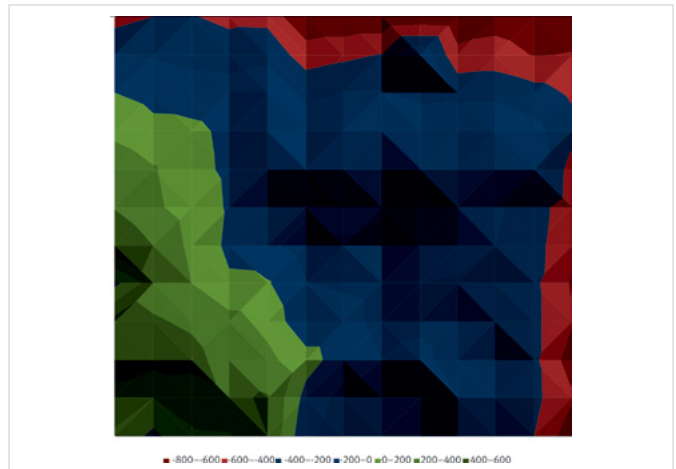


Рис. 4 — Показания ВД-90НП на палетте, представленные в графическом виде

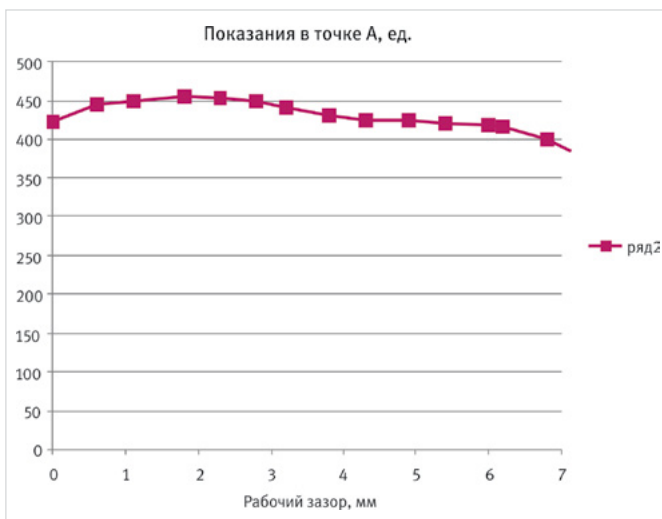


Рис. 5 — Показания дефектоскопа ВД-90НП в зоне максимума локального упрочнения

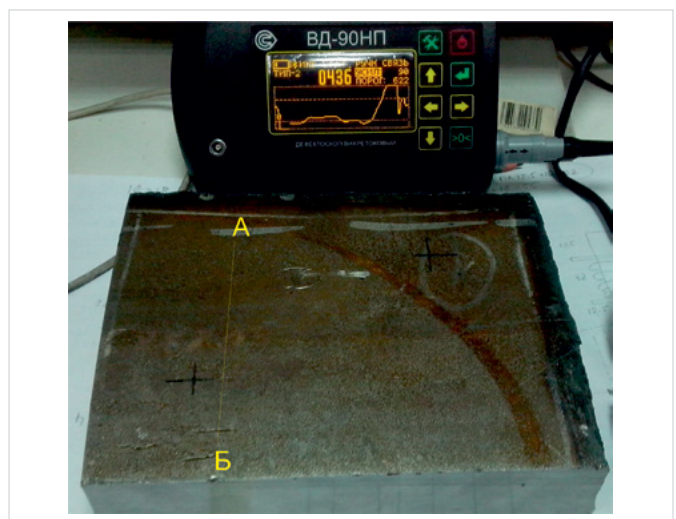


Рис. 6 — Показания ВД-90НП по линии А-Б

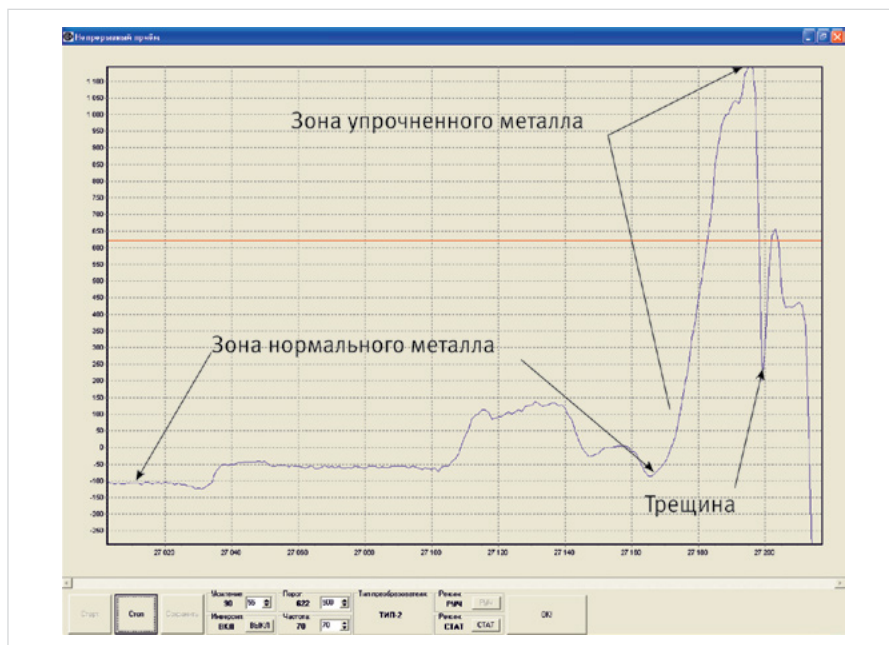


Рис. 7 — Показания ВД-90НП по линии А-В, переданные в ПК

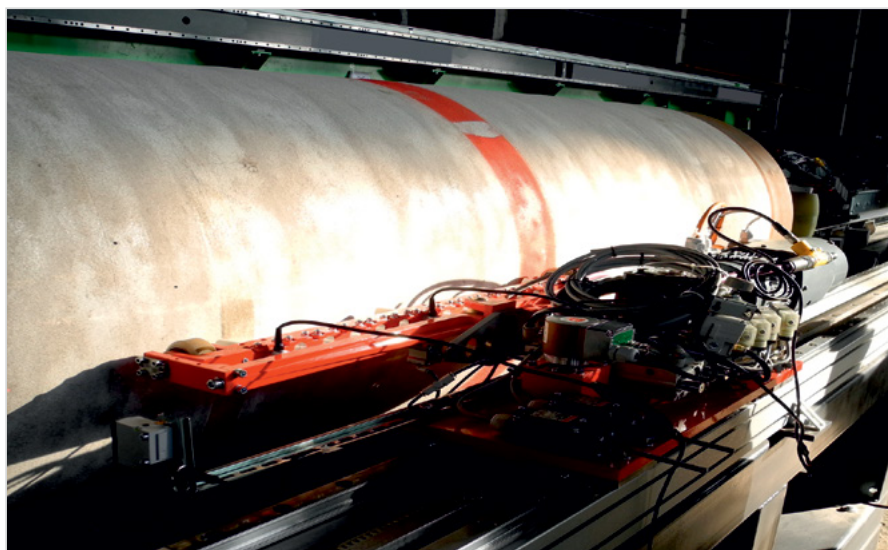


Рис. 8 — Система автоматизированного вихретокового контроля труб большого диаметра на базе ВД-91НМ

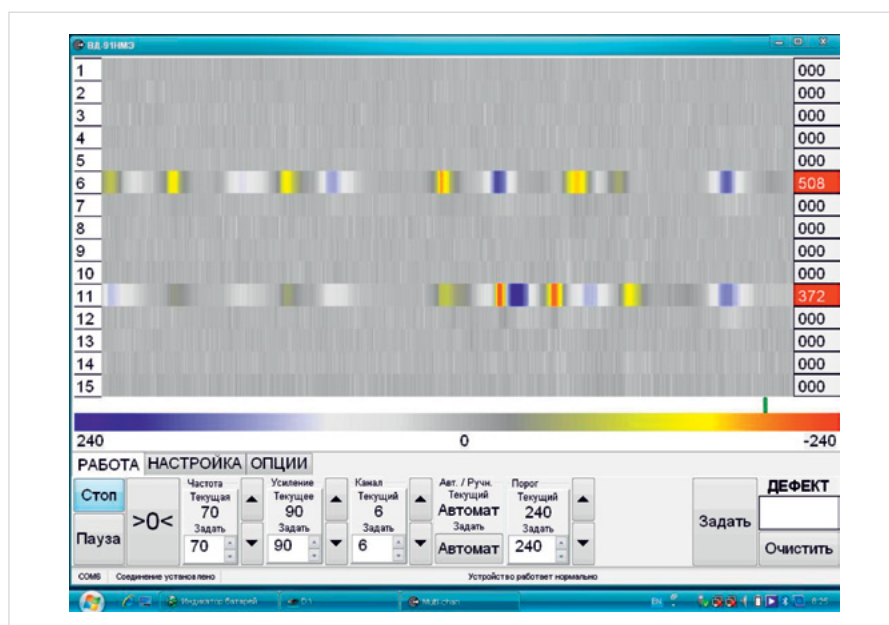


Рис. 9 — Экран оператора в режиме развертки трубы

видно растрескивание в зоне локального упрочнения.

На рис. 7 представлен сигнал вихретокового дефектоскопа, который был получен на участке А-В и передан на персональный компьютер (ПК). На рисунке видно изменение показаний в зоне локального упрочнения и характерный сигнал, вызванный уже существующим трещиноподобным дефектом в данной зоне упрочнения.

Практическая реализация результатов исследования

На основании анализа полученных экспериментальных данных сделан вывод о применимости вихретокового метода НК для обнаружения дефектов типа трещина и локальное упрочнение, в том числе и через толстые изоляционные и защитные покрытия. ЗАО «НИИИМ МНПО «СПЕКТР» и ЗАО «УЛЬТРАКРАФТ» разработали систему вихретокового неразрушающего контроля труб большого диаметра. Основой системы является многоканальный вихретоковый дефектоскоп ВД-91НМ, который осуществляет 32-канальный амплитудно-фазовый контроль внутренней и внешней поверхности трубы через изоляционные покрытия переменной толщины (до 10 мм). Практические испытания показали, что дробеструйной обработки поверхности, выполняемой в процессе производства труб, достаточно для получения «квазизнородного» состояния поверхности при котором ВД-91НМ способен выявлять дефекты глубиной от 0,3 мм и зоны локального упрочнения, имеющие отличающуюся от основного металла на 20% твердость. Время контроля трубы длиной 12 м и диаметром 813 мм не превышает 5 мин. В итоговый протокол заносится развертка трубы с цветовым кодированием уровня сигнала и таблица выявленных дефектов.

Используемые в ВД-91НМ программные и аппаратные решения позволяют в широчайших пределах отстроиться от такого основного мешающего параметра как рабочий зазор преобразователя. На сегодняшний день ВД-91НМ единственная вихретоковая система в мире, позволяющая работать с переменным зазором до 10 мм без потери чувствительности к трещиноподобным дефектам и локальным упрочнениям. Указанные характеристики позволяют проводить контроль труб, в том числе и в зоне сварного шва. Большой диапазон рабочего зазора, в том числе делает возможным проведение контроля труб предназначенных для морских подводных переходов, толщина изоляции которых достигает 8 мм [8].

На рис. 8. приведена каретка с преобразователями во время контроля наружной стенки трубы через изоляционное защитное покрытие толщиной 8 мм. Внешний вид экрана оператора в режиме развертки трубы показан на рис. 9. На него вынесены органы управления дефектоскопом ВД-91НМ и параметры его настройки при контроле внешней стенки трубы большого диаметра.

Итоги

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что вихретоковый метод является единственным методом НК, позволяющим выявлять локальные пятна твердости через защитные и изоляционные покрытия. Он обладает высокой чувствительностью и скоростью контроля и

должен применяться при выходном контроле качества изделий трубной промышленности. Поскольку другие методы не позволяют находить указанный тип дефектов, отсутствие вихретокового контроля при производстве труб большого диаметра значительно снижает достоверность результатов неразрушающего контроля.

Выводы

1. Вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП со стандартным преобразователем уверенно отличает зону повышенной твердости от зоны основного материала ОК вплоть до рабочего зазора 7 мм.
2. Доработка программного обеспечения дефектоскопа способна снизить влияние изменения зазора на выходной сигнал.
3. Возможно увеличение скорости контроля за счет применения многоканальной системы вихретокового контроля и частичной или полной механизации и автоматизации такой системы.

Список используемой литературы

1. Klyuev V.V., Muzhitskiy V.F., Gorkunov E.S., Scherbinin V.E., Fedosenko Yu.K., et al. NONDESTRUCTIVE TESTING Handbook: In 8 volumes. V. 1: in 3 books. Vol. 1 Magnetic Testing, Eddy-current Testing, X-ray Testing. Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Spektr 2010. 1008 p.
2. Федосенко Ю.К., Шкатов П.Н., Ефимов А.Г. Вихретоковый контроль. Учебное пособие. М.: Спектр, 2011. 224 с.
3. Загидулин Р.В., Мужижкий В.Ф., Ефимов А.Г., Загидулин Т.Р., Шубочкин А.Е. Исследование влияния продуктов коррозии магистрального нефтепродуктопровода на сигнал вихретокового дефектоскопа ВД-12НФП // Контроль. Диагностика. 2007. № 9. С. 42–46.
4. Ефимов А.Г. К влиянию продуктов коррозии металла и отложений на выявляемость дефектов сплошности при электромагнитном контроле стальных изделий. Часть 1 // Контроль. Диагностика. 2012. № 1. С. 26–33.
5. Ефимов А.Г. К влиянию продуктов коррозии металла и отложений на выявляемость дефектов сплошности при электромагнитном контроле стальных изделий. Часть 2 // Контроль. Диагностика. 2012. № 2. С. 25–33.
6. Ефимов А.Г. Распределение сигнала накладного вихретокового преобразователя над стальным изделием с внутренним дефектом сплошности в приложенном магнитном поле // Контроль. Диагностика. 2012. № 3. С. 17–24.
7. Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е. Современные тенденции развития вихретоковой дефектоскопии и дефектометрии // Контроль. Диагностика. 2014. № 3. С. 68–73.
8. Ефимов А.Г., Шубочкин А.Е., Мартыанов Е.В. Современные вихретоковые системы неразрушающего контроля металлопроката // Контроль. Диагностика. 2014. № 12. С. 19–21.

ENGLISH

DIAGNOSTICS

Highly-efficient control the hardness on pipes with smooth coating

UDC 620.1

Authors:

Alexey G. Efimov — Sc.D., head of department¹; efimov@nio12.ru
Andrey E. Shubochkin — Sc.D., head of sector²; aeshubochkin@mail.ru
Evgenii V. Martyanov — postgraduate, jr. researcher¹; eugeniomartino@mail.ru
Pavel N. Mefodichev — undergraduate, engineer¹; i-paxa@mail.ru

¹JSC RII “Spectrum”, Moscow, Russian Federation

Abstract

In the article considered the metal-roll quality control issue. It were conducted the comparison of eddy current method of nondestructive testing and classic methods that using in metal-roll production by X-ray and supersonic methods. Description of developed automated line for testing was presented.

Materials and methods

Large diameter pipes were tested by eddy current and magnetic methods.

Results

Conducted theoretical and experimental

studies revealed that eddy current testing is the only nondestructive method allows indicating local problems of hardness through protecting and isolating coats. It has high sensitivity and control speed and should apply in final testing the quality of pipe production. Other methods do not allow detecting this type defects. The validity of nondestructive control is significantly deteriorated without eddy current control in production large diameter pipes.

Conclusions

1. Eddy current detector VD-90NP using ordinary probe knows area of increased hardness from area of original material

through 7 mm gap.

2. Improving detector's software allows to undercut influence the gap change on output signal.
3. Increasing of control speed is possible by applying multichannel system eddy current control and local or complete mechanization and automation this system.

Keywords

nondestructive testing, eddy current testing, eddy current defectoscopy, local hardening, hardness control, microfissures, welded joint control, pipe control

References

1. Klyuev V.V., Muzhitskiy V.F., Gorkunov E.S., Scherbinin V.E., Fedosenko Yu.K., et al. NONDESTRUCTIVE TESTING Handbook: In 8 volumes. V. 1: in 3 books. Vol. 1 Magnetic Testing, Eddy-current Testing, X-ray Testing. Edited by V.V. Klyuev. Moscow: Spektr, 2010, 1008 p.
2. Fedosenko Yu.K., Shkatov P.N., Efimov A.G. *Vikhretokovyy kontrol'* [Eddy current testing]. Study book, Moscow: Spektr, 2011, 224 p.
3. Zagidulin R.V., Muzhitskiy V.F., Efimov A.G., Zagidulin T.R., Shubochkin A.E. *Issledovanie vliyaniya produktov korrozii magistral'nogo nefteproduktoprovođa na signal vikhretokovogo defektoskopa VD-12NFP* [Arterial pipeline corrosion oil products effects analysis on vortex-current defectoscope signal of VD-12NFP]. Testing. Diagnostic, 2007, issue 7, pp. 42–46.
4. Efimov A.G. *K vliyaniyu produktov korrozii metalla i otlozheniy na vyavlyaemost' defektov sploshnosti pri elektromagnitnom kontrole stal'nykh izdeliy* [By the influence of corrosion products and metal deposits on the detection of defects in the continuity of the electromagnetic control of steel products. Part 1]. Testing. Diagnostic, 2012, issue 1, pp. 26–33.
5. Efimov A.G. *K vliyaniyu produktov korrozii metalla i otlozheniy na vyavlyaemost' defektov sploshnosti pri elektromagnitnom kontrole stal'nykh izdeliy. Chast' 2* [By the influence of corrosion products and metal deposits on the detection of defects in the continuity of the electromagnetic control of steel products. Part 2]. Testing. Diagnostic, 2012, issue 2, pp. 25–33.
6. Efimov A.G. *Raspredelenie signala nakladnogo vikhretokovogo preobrazovatelya nad stal'nym izdeliem s vnutrennim defektom sploshnosti v prilozhennom magnitnom pole* [Eddy current probe signal distribution over steel products with an internal flaw in the applied magnetic field]. Testing. Diagnostic, 2012, issue 3, pp. 17–24.
7. Efimov A.G., Shubochkin A.E. *Sovremennyye tendentsii razvitiya vikhretokovoy defektoskopii i defektometrii* [Modern trends of eddy current flaw detection and defectometry]. Testing. Diagnostic, 2014, issue 3, pp. 68–73.
8. Efimov A.G., Shubochkin A.E., Mart'yanov E.V. *Sovremennyye vikhretokovyye sistemy nerazrushayushchego kontrolya metalloprokata* [Modern eddy current flaw detection system for rolled steel]. Testing. Diagnostic, 2014, issue 12, pp. 19–21.