

Об использовании технологии MFL для выявления коррозионных повреждений обшивки судов

Рассмотрены вопросы применения технологии Magnetic Flux Leakage (MFL) для контроля коррозионных повреждений обшивки судов при плановых ремонтах. Рассмотрены модели измерительных преобразователей, принципы оптимизации их магнитной системы. Приведены результаты расчетов их геометрических и магнитных характеристик.

Submitted 16.07.15

Accepted 01.08.15

V. A. Syasko*

About MFL Technology Application for Ship Plating Corrosion Damages Detection

Introduction. The article considers matters on ensuring entire nondestructive inspection of ship plating residual thickness with the use of Magnetic Flux Leakage (MFL) technique. The work aim is optimization of measuring transducers magnetic system parameters in order to guarantee the required sensitivity level at the plating thickness range of 3-16 mm.

Method. Physical and mathematical models of transducers were developed; the finite-element method was used for formulating the optimization criteria.

Results. Dependences have been obtained that link tested thicknesses range and measurement error with magnetic system geometry and magnetization modes. The influence of nuisance parameters has also been studied.

Conclusion. A set of measuring transducers for entire ship plating residual thickness measurements as well as techniques for adjustment and testing for pitting and planar corrosion detection have been developed as a result of this work.

Keywords: magnetic inspection, MFL, corrosion, ship plating, ship-repairing

В настоящее время для контроля обшивки судов традиционно применяется ультразвуковая контактная толщинометрия, не позволяющая получить сплошную карту коррозионных повреждений. Представляет интерес использование для этих целей технологии MFL — Magnetic Flux Leakage Technology (технологии магнитного вида неразрушающего контроля, использующей, в соответствии с ГОСТ 24450–80, метод эффекта Холла для анализа магнитного поля рассеяния дефекта), широко применяемой ведущими компаниями «Silverwing», «Rosen», «NDT Technologies», «Интрон+», «Спецнефтегаз» и др., производящими оборудование для выявления коррозионных и механических повреждений стенок изделий из черных металлов, главным образом трубопроводов и днищ цилиндрических резервуаров (например, нефтехранилищ).

Рассмотрим основные положения метода. При расположении П-образного постоянного магнита на некотором расстоянии от стенки ферромагнитного изделия часть силовых линий прерывается на границе раздела двух сред (магнит/воздух и воздух/стенка изделия)

с отличающимися значениями абсолютной магнитной проницаемости μ :

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{B} = \operatorname{div} \mu \mathbf{H}; \\ \operatorname{div} \mathbf{B} = \mu_1 \mathbf{H}_{n1} - \mu_2 \mathbf{H}_{n2} = 0, \end{cases}$$

Отсюда следует, что $\mu_1 \mathbf{H}_{n1} = \mu_2 \mathbf{H}_{n2}$, и преломление магнитных силовых линий происходит по закону тангенсов [1]. При использовании редкоземельных магнитов (Nd—Fe—B) с индукцией $B_m \approx 1 \div 1,12$ Тл на границе раздела воздух/сталь магнитные силовые линии направлены практически перпендикулярно к поверхности, в то время как в объеме изделия они стремятся проходить практически параллельно поверхности. При определенных соотношениях толщины T стенки изделия (листа) и размеров магнита все силовые линии магнитного потока будут проходить внутри листа, лишь незначительная часть из них выйдет наружу (рис. 1а).

В случае если на одной из поверхностей листа будет участок с локальным угонением (например, питтинговой коррозией), то произойдет изменение картины магнитного поля (рис. 1б). Плотность силовых линий в районе дефекта возрастет, и часть магнитных силовых линий выйдет из листа как со

стороны установки магнита, так и с противоположной стороны (произойдет рассеяние магнитного потока), что может быть зафиксировано путем измерения нормальной H_n составляющей напряженности магнитного поля или магнитного потока Φ , пронизывающего параллельный поверхности листа твердотельный чувствительный элемент площадью S :

$$\Phi_i = \oint B_n dS = \oint \mu_0 H_n dS,$$

где B_n и H_n — нормальные составляющие магнитной индукции и напряженности магнитного поля в точке измерения, располагаемой симметрично между полюсами магнита.

Первичные измерительные преобразователи (в дальнейшем преобразователи), реализующие рассматриваемую технологию НК, представляют собой П-образные магнитопроводы со вставками из постоянных редкоземельных магнитов (Nd—Fe—B) и многоканальную систему чувствительных элементов, располагаемых симметрично между полюсами магнитопровода в области магнитного поля одной интенсивности (рис. 2). Базовые преобразователи фирмы «Silverwing», одного из осново-

СЯСЬКО
Владимир
Александрович

Генеральный директор
ООО «Константа»
(Санкт-Петербург), д. т. н.
Научные интересы:
контроль физико-механических характеристик
микро- и наноструктурированных материалов.



* CONSTANTIA Ltd, St. Petersburg, Russia; office@constanta.ru

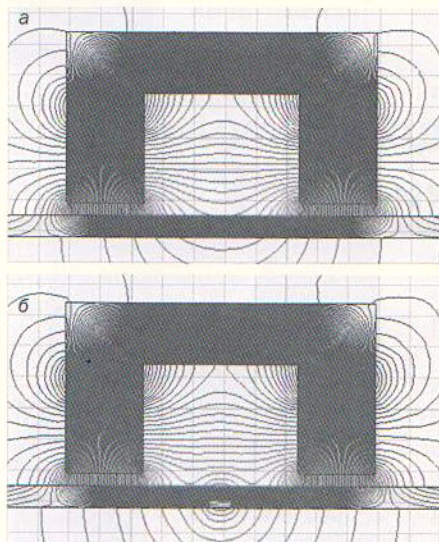


Рис. 1. Расчетная картина силовых линий магнитного поля на бездефектном участке стального листа (а) и линий магнитного поля рассеяния в районе искусственного дефекта (б)

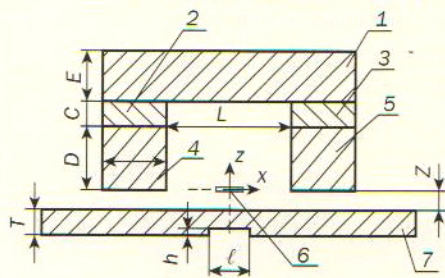


Рис. 2. Первичный измерительный преобразователь, реализующий технологию MFL, и объект контроля с искусственным дефектом в виде поперечного пропила, имитирующим коррозионное повреждение стенки: 1 — ярмо магнитопровода; 2 и 3 — редкоземельные магниты; 4 и 5 — полюса магнитопровода; 6 — чувствительный элемент/точка наблюдения; 7 — стальной лист с искусственным дефектом

положников данной технологии, имеют следующие размеры: длина магнита $A=25$ мм, высота магнита $C=10$ мм, высота ярма $E=20$ мм, высота полюса $D=25$ мм, расстояние между полюсами $L=50$ мм, технологический зазор $Z=5$ мм. Ширина магнитопровода составляет 40 мм. Преобразователи предназначены для выявления плоскостной и питтинговой коррозии изделий с толщиной T стенки от 6 до 16 мм. При $l \approx T$ гарантированно выявляются искусственные дефекты глубиной от $h=1,8$ мм ($T=6$ мм) до $h=8$ мм ($T=16$ мм). В качестве чувствительных элементов используются преобразователи Холла, анализирующие изменение составляющей B_z магнитной индукции в точке наблюдения при перемещении преобразователя относительно дефекта вдоль оси x (начало системы координат связано с центром пропила).

В [2] показано, что эффективное использование технологии MFL для конкретных объектов предполагает проектирование оптимальной, отвечающей конкретной задаче измерительной системы, применение специальных методов обработки измерительной информации и адекватной интерпретации результатов. В частности, для изделий судоремонта необходимо обеспечивать оптимальную чувствительность во всем диапазоне толщин наружной обшивки, состоящей из отдельных листов, которые с помощью сварки соединены друг с другом, со шпангоутами, палубами и днищевыми связями. В зависимости от размеров судна ширина листов составляет от 1,2 до 2,8 м, а длина — от 5 до 10 м. В оконечностях судна устанавливаются листы меньших размеров, так как объемная гибка и установка листов больших размеров были бы слишком трудоемки. Толщина наружной обшивки зависит от длины судна, высоты борта до верхней непрерывной палубы, а также от осадки и расстояния между шпангоутами (шпации). Но даже у одного и того же судна толщина наружной обшивки не везде одинакова. Так, при волнении судно испытывает самые большие изгибающие напряжения в средней части, поэтому там листы толще, чем в оконечностях. Как правило, более толстыми, чем другие пояса листов, выполняют также ширстрек и горизонтальный киль, потому что они являются важными продольными связями и дополнительно подвержены нагрузкам, действующим на поперечные связи. Большие сжимающие нагрузки испытывает горизонтальный киль при доковании, поэтому днищевые пояса толще, чем бортовые. Максимальная толщина T листов составляет: для судов длиной 20 м около 5 мм, а для судов длиной 100 м — примерно 15 мм.

Представляется вероятным, что не для всех точек диапазонов изменения T и h чувствительность рассматриваемого преобразователя, характеризующая изменением амплитуды $B_z(h)$ в зоне коррозионного повреждения, будет оптимальной, что, в свою очередь, не обеспечит требуемую погрешность измерений остаточной толщины во всем диапазоне толщин листов обшивки судна.

Основные показатели качества преобразователей:

- чувствительность преобразователя $d/dh [B_z(h, T)]$, определяющая погрешность измерения $\Delta h(h, T)$, а также диапазон измерения $h_{\min} + h_{\max}$;

- минимально возможные размеры магнитопровода, обеспечивающие заданные $\Delta h(h, T)$ и $h_{\min} + h_{\max}$ в требуемом диапазоне толщин $T_{\min} + T_{\max}$;
- масштабные и эргономические характеристики.

Для обеспечения требуемых показателей качества необходимо искать компромиссное решение, так как они являются взаимосвязанными.

При анализе преобразователя, представленного на рис. 2, будем полагать ширину магнитопровода много больше его высоты C и длины A , что позволяет исключить ее влияние при расчетах.

В настоящее время для решения задач, связанных с анализом электромагнитных полей, широко применяется метод конечных элементов [3].

Искомые значения параметров будем рассчитывать в узловых точках (узлах) — общих точках конечных элементов. Скалярный магнитный потенциал Φ^M каждого конечного элемента представим в виде полинома с постоянными в пределах этого элемента коэффициентами:

$$\Phi^M = a_i + b_i x + c_i y.$$

Основная задача расчета методом конечных элементов — определить коэффициенты a_i, b_i, c_i . После нахождения коэффициентов появляется возможность рассчитать магнитный потенциал в любой точке пространства модели. Исходные данные, дополненные граничными условиями, и энергетические зависимости приводят к системе алгебраических уравнений, которая позволяет рассчитать искомые коэффициенты полиномов во всех конечных элементах [4].

Применительно к рассматриваемой задаче при граничных условиях первого рода (условия Дирихле) минимизируемым функционалом является величина, пропорциональная запасенной в пространстве магнитной энергии:

$$W_M = 0,5 \cdot \int \mu_0 H^2 dv,$$

Так как $H = -\text{grad } \Phi^M$, то минимизируемый функционал можно записать в виде:

$$W_M = 0,5 \cdot \int \mu_0 (\text{grad } \Phi^M)^2 dv,$$

а искомой (минимизирующей) функцией будет $\Phi^M(\xi, \zeta, \eta)$, при которой $W_M\{\Phi^M\} \geq \min$. В качестве функционала выступает сумма магнитных энергий, накопленных во всех конечных элементах. В данной модели элементы соприкасаются в общих — узловых — точках. Энергия элементов определяется магнитными потенциалами узловых точек $W = W\{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N\}$, где N — число точек.

На основании анализа и определения магнитных потенциалов узловых точек, при которых W_M минимальна, формируется система алгебраических уравнений, рассчитываются магнитные потенциалы, вычисляются магнитная индукция и напряженность магнитного поля [5].

Под оптимальными геометрическими характеристиками преобразователя будем понимать такие характеристики и их соотношения, при которых достигается максимальная чувствительность в требуемой области $h_{\min} \div h_{\max}$ измеряемых объектов контроля в диапазоне толщин стенки $T_{\min} \div T_{\max}$ при минимально возможных габаритах.

При использовании программных продуктов, реализующих метод конечных элементов, можно сформулировать следующую постановку задачи расчета преобразователя: двухуровневая, осесимметричная, стационарная, в общем случае нелинейная, с открытыми границами со следующими допущениями:

- в достаточно удаленной от преобразователя зоне создаваемое им магнитное поле бесконечно мало;
- отсутствуют внешние магнитные поля;
- модель полностью стационарна (отсутствует временной и температурный дрейф физических характеристик преобразователя).

Согласно первым двум допущениям в качестве граничных условий для моделей рассматриваемых преобразователей можно назначить граничные условия первого рода. В рассматриваемой задаче это граничное условие применимо для задания нулевого значения нормальной составляющей вектора магнитной индукции на оси симметрии (в точке наблюдения) и для указания полного затухания поля на условно бесконечно удаленных от преобразователя границах. Варьируемыми параметрами будут толщина листа T , относительная координата $x^* = x/T$, относительная глубина $h^* = h/T$ при постоянной относительной ширине пропила $l^* = l/T = 1$. При расчетах примем конструктивную величину зазора $Z = 5$ мм, а магнитную индукцию в магнитопроводе $B_M \approx 1,12$ Тл.

На рис. 3 в качестве примера представлены расчетные зависимости $B_z(h^*, x^*)$ при симметричном относительно пропила положении преобразователя для $Z = 5$ мм и $T = 8$ мм, из которых видно, что максимальное значение $B_{zm}(h^*)$ достигается на краях пропила при $1/2 x^* \approx 0,5$, а в области центра пропила $B_z(h^*, x^* = 0) \approx 0$.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости $B_{zm}(h^*, T)$ для рассматри-

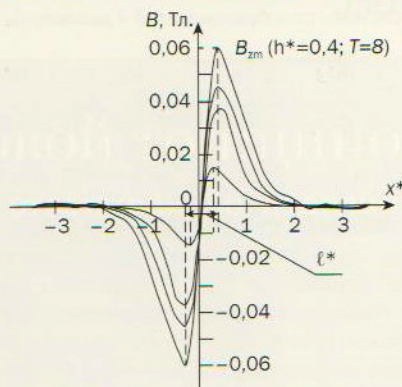


Рис. 3. Зависимость $B_z(h^*, x^*)$ над листом из стали 1010 толщиной $T = 8$ мм в районе поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм

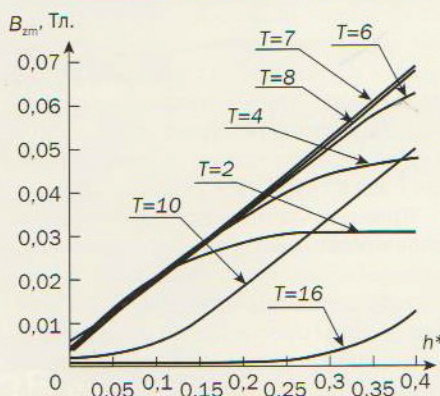


Рис. 4. Зависимость $B_{zm}(h^*, T)$ над листом из стали 1010 с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z = 5$ мм

ваемой модели преобразователя над ферромагнитным листом из малоуглеродистой стали 1010 (аналог Ст10) с искусственным дефектом в виде поперечного пропила, выполненным в соответствии с рис. 2.

Из рис. 4 видно, что в диапазоне $h^* \approx 0,05 \div 0,4$ преобразователь имеет наибольшую чувствительность при $T \approx 6 \div 8$ мм. Если $T < 4$ мм, то наблюдается существенная нелинейность характеристики и уменьшение чувствительности при $h^* > 0,1 \div 0,2$. При $T > 10$ преобразователь практически полностью теряет чувствительность в области $h^* < 0,15$. Расчеты показывают, что для $h^* \approx 0,05 \div 0,35$ близкие характеристики обеспечиваются в диапазоне $T \approx 5 \div 9$ мм. Из этого можно сделать вывод о величине оптимальной намагниченности металла для проведения контроля.

На рис. 5 приведены расчетные значения магнитной индукции B_M и относительной магнитной проницаемости μ металла листа при его намагничивании преобразователем в зависимости от толщины листа для сталей марок 1010 и 1008 (близкой по характеристикам

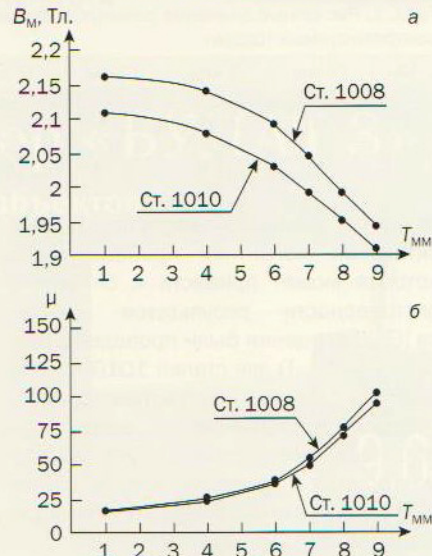


Рис. 5. Зависимость магнитной индукции B_M (а) и относительной магнитной проницаемости μ (б) в металле листа от его толщины T в зоне установки чувствительного элемента

к Ст. 10) в зоне установки чувствительного элемента при $h^* = 0$. В соответствии со сказанным оптимальной является величина $1,9 < B_M < 2,05$ Тл. Для проведения контроля металл следует намагничивать до величины, соответствующей $30 < \mu < 70$.

Введем относительные размеры преобразователя: $A^* = A/T$; $C^* = C/T$; $E^* = E/T$; $D^* = D/T$; $L^* = L/T$; $Z^* = Z/T$. При $T_0 = 7$ мм для рассматриваемого преобразователя обозначим как оптимальные: $A_0^* = 3,57$; $C_0^* = 1,43$; $E_0^* = 2,86$; $D_0^* = 3,57$; $L_0^* = 7,14$; $Z_0^* = 0,71$. В диапазоне контроля ΔT от 5 до 9 мм относительные размеры преобразователя будут изменяться в пределах: $\Delta A^* \approx (5 \div 2,77)$; $\Delta C^* \approx (2 \div 1,11)$; $\Delta E^* \approx (4 \div 2,22)$; $\Delta D^* \approx (5 \div 2,77)$; $\Delta L^* \approx (10 \div 5,55)$; $\Delta Z^* \approx (1 \div 0,55)$.

В соответствии с рис. 2 при условии геометрического подобия магнитных систем преобразователей можно разбить весь диапазон контролируемых толщин T на поддиапазоны, для каждого из которых относительные размеры преобразователей будут соответствовать оптимальным и изменяться в установленных для них пределах. В табл. 1 приведены рассчитанные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны измерения, соответствующие сформулированным требованиям.

При выявлении мест питтинговых коррозионных повреждений крупногабаритных объектов контроля, например, нефтеналивных емкостей или магистральных трубопроводов, одним из основных мешающих параметров

Табл. 1. Расчетные значения размеров магнитной системы преобразователей и диапазоны контролируемых толщин

№	T_0 , мм	A, мм	C, мм	E, мм	D, мм	L, мм	Z, мм	ΔT , мм
1	3,8	13,6	5,4	10,8	13,6	27,2	2,7	2,7–5,3
2	7	25	10	20	25	50	5	5–9
3	12	42,8	17,1	34,3	42,8	85	8,5	9,2–15,9

является локальная девиация $\Delta\mu$ относительной магнитной проницаемости, которая может привести к снижению достоверности результатов контроля [6]. Для оценки были проведены расчеты $B_{zm}(h^*, T)$ для сталей 1010 и 1008 (рис. 6), отличие магнитных свойств которых сопоставимо с возможной локальной девиацией $\Delta\mu$ для указанных объектов контроля. В этом случае в процессе сканирования поверхности девиация $\Delta B_{zm}(h^*, T) = \frac{1}{2} B_{zm}(h^*, T)_{ст1010} - B_{zm}(h^*, T)_{ст1008} < 0,002$ Тл практически во всем диапазоне h^* , что не приведет к существенному увеличению погрешности измерений глубины и размеров питтинговых коррозионных повреждений.

Девиация зазора Z (например, толщины защитного покрытия) также будет приводить к изменению чувствительности преобразователя и неопределенности при оценке глубины питтинговой коррозии, т. к. $B_{zm} \sim 1/Z$ при прочих равных условиях [7].

До недавнего времени контрольные образцы, применявшиеся для калибровки измерительных преобразователей, реализующих технологию MFL, представляли собой листы металла, аналогичного

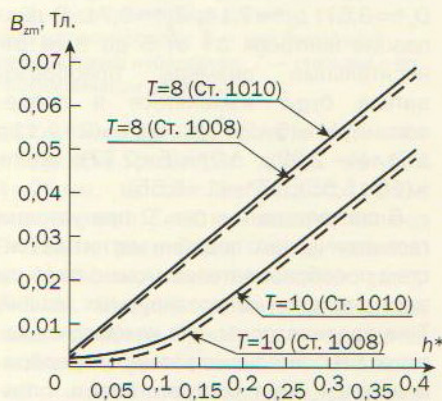


Рис. 6. Зависимость $B_{zm}(h^*, T)$ над ферромагнитным листом из сталей марок 1010 и 1008 с искусственным дефектом в виде поперечного пропила шириной $l^* = 1$ при $Z=5$ мм

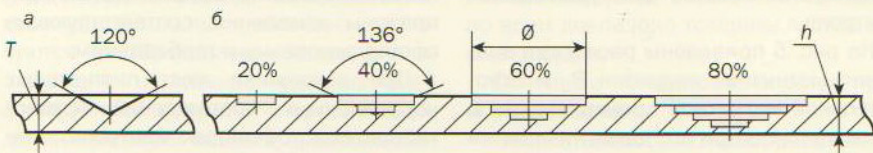


Рис. 7. Контрольные образцы с искусственными дефектами: коническим, глубиной $0,4T$ (а) и ступенчатыми коническими, глубиной $(0,2-0,8) T$, имитирующими питтинговые коррозионные повреждения (б)

по толщине и составу реальным изделиям, с коническими сверлениями с углом 120° глубиной от $0,2T$ до $0,8T$ (рис. 7а), которые позволяют настраивать оборудование и выявлять питтинговую коррозию с высокой достоверностью. Однако выполненные ведущими производителями эксперименты показали, что более перспективным является использование контрольных образцов с искусственными дефектами ступенчатой конической формы с углом 136° и глубиной h от $0,2T$ до $0,8T$ (рис. 7б), изготавливаемых с использованием проходных фрез. В этом случае диаметр искусственного дефекта $\varnothing = T$ для $h^* = 0,2$ и $\varnothing = 2T$ для $h^* = 0,4$.

Применение последнего поколения миниатюрных интегральных преобразователей Холла (например, А1395 фирмы «Allegro») с шагом установки приблизительно 1 мм обеспечивает возможность выявления коррозионных повреждений глубиной $h^* = 0,15$ для объектов контроля с толщиной стенки $T_{min} \geq 2,7$ мм.

Выводы

Макетирование измерительных преобразователей показало сходимость результатов моделирования и расчетов с экспериментальными данными, в частности, уменьшение $\Delta h(h, T)$ при расширении диапазонов h^* и T . Настройка преобразователей с использованием контрольных образцов перед началом работы позволит осуществлять в условиях дока сплошной контроль листов обшивки с толщиной стенки T от 2,7 до 16 мм и измерять глубину питтинговых коррозионных повреждений в диапазоне h^* от 0,15 до 0,4 с абсолютной допустимой погрешностью $\Delta h \leq 0,1h$, сопоставимой с погрешностью при ультразвуковой толщинометрии в учет большой величины шероховатости поверхности листов [8].

Литература

1. Неразрушающий контроль / Справочник в 7 т. под ред. В.В. Клюева. Т. 6., кн. 1: Магнит-

ные методы контроля. — М.: Машиностроение, 2004. — 375 с.

2. Слесарев Д.А., Абакумов А.А. Обработка и представление информации в MFL методе неразрушающего контроля. — Дефектоскопия. 2013. №9. С. 3–9.

3. Вишняков С.В., Гордюхина Н.М., Федорова Е.М. Расчет электромагнитных полей с помощью программного комплекса ANSYS. — М: МЭИ (ТУ), Кафедра электрофизики, 2003.

4. Андреева Е.Г., Шамец С.П., Колмогоров Д.В. Расчет стационарных магнитных полей и характеристик электротехнических устройств с помощью программного пакета ANSYS. — Нефтегазовое дело. — Омск: Омский гос. технич. ун-т, 2005. Доступно на: http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf

5. Potapov A.I., Syasko V.A. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий/Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманитика, 2009. — 904 с.

6. Stanley R. Basic Principles of Magnetic Leakage Inspection Systems for the Evaluation of Oil Country Tubular Goods. — In: Electromagnetic Methods of Nondestructive Testing. — NY: Gordon and Breach, 1985, p. 97–150.

7. Stenley R. Magnetic Leakage Field Measurements. — In: Magnetic Testing, Vol. 8. — Columbus, OH: ASNT, 2008, p. 139–156.

8. ASTM E 570–97. Standard Practice for Flux Leakage Examination of Ferromagnetic Steel Tubular Products.

References

1. Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik v 7 t. pod red. V.V. Klyueva. T. 6, kn. 1: Magnitnye metody kontrolya [Nondestructive Testing. Handbook in 7 volumes edited by prof. V.V. Klyuev. V. 6, book 1: Magnetic methods of testing]. Moscow, Mashinostroenie, 2004, 375 p. (in Russ.).

2. Slesarev D.A., Abakumov A.A. Russ. J. Nondestructive Testing. 2013, no.9, pp. 493–498.

3. Vishnyakov S.V., Gordyukhina N.M., Fedorova E.M. Raschet elektromagnitnykh poley s pomoshch'yu programmnogo kompleksa ANSYS [Electromagnetic fields calculation with ANSYS software]. Moscow, MEI (TU), 2003 (in Russ.). Available at: <http://www.twirpx.com/file/292255>

4. Andreeva E.G., Shamets S.P., Kolmogorov D.V. Raschet stacionarnykh magnitnykh poley i kharakteristik elektrotekhnicheskikh ustroystv s pomoshch'yu programmnogo paketa ANSYS [Calculation of stationary magnetic fields and characteristics of electrical devices with ANSYS software]. Omsk, Omsk State Tech. Univ., 2005 (in Russ.). Available at: http://www.ogbus.ru/authors/Andreeva/Andreeva_1.pdf

5. Potapov A.I., Syasko V.A. Nerazrushayushchye metody i sredstva kontrolya tolshchiny pokrytiy i izdeliy [Nondestructive methods and means for thickness measurements of coatings and products]. St. Petersburg, Gumanitika, 2009, 904 p. (in Russ.).

6. Stanley R. Basic Principles of Magnetic Leakage Inspection Systems for the Evaluation of Oil Country Tubular Goods. In: Electromagnetic Methods of Nondestructive Testing. NY: Gordon and Breach, 1985, pp. 97–150.

7. Stenley R. Magnetic Leakage Field Measurements. In: Magnetic Testing, Vol. 8. Columbus, OH: ASNT, 2008, p. 139–156.

8. ASTM E 570–97. Standard Practice for Flux Leakage Examination of Ferromagnetic Steel Tubular Products.

Статья получена 16 июля 2015 г., в окончательной редакции — 1 августа