Церазрушающий Контроль и Циагностика







Главный редактор

Мигун Николай Петрович

Редакционная коллегия:

Аскирко С.Д. Боровский В.В. Венгринович В.Л. Войцехович Л.Н. Высоцкий М.С. Горбаш В.Г. Жагора Н.А. Зуйков И.Е. Ивлев С.А. Кулагин В.Н. Лухвич А.А. Матюк В.Ф. Мелешко А.Л. Пантелеенко Ф.И. Попоудина С.А. Рудницкий В.А. Сергеев С.С.

Неразрушающий Контроль и Диагностика

№ 2, 2012

Научно-практический журнал

Электронная версия журнала на сайте science.by (nauka.of.by)

Учредители

Белорусская ассоциация неразрушающего контроля и технической диагностики, республиканское общественное объединение

Институт прикладной физики НАН Беларуси, государственное научное учреждение

«Диатех», республиканское научно-производственное унитарное предприятие

Министерство информации Республики Беларусь 4 ноября 2011 г. зарегистрировало журнал «Неразрушающий контроль и диагностика» в Государственном реестре средств массовой информации за № 1488.

Журнал входит в «Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований».

Журнал НКД зарегистрирован в международном каталоге научных журналов со свободным доступом к полным текстам. DOAJ (Directory of Open Access Journals, **http://www.doaj.org**).

Неразрушающий контроль и диагностика

(Электронная версия журнала: http://science.by/nauka/13/)

Научно-практический журнал

Издатели

Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Диатех»

Адрес редакции: 220072 г. Минск, ул. Академическая, 16, к. 314. Тел.: +375 17 284 0686, факс: +375 17 284 1740, e-mail: diatech@tut.by URL http://science.by/nauka/13/

Подписной индекс (ведомственная подписка) 00844

Подписано в печать 30.05.2012. Формат 60х84 1/8. Бумага офсетная. Гарнитура Cambria. Усл. печ. л. 8,60. Тираж 100 экз.

Печать цифровая. Государственное предприятие «Диатех», 220072 г. Минск, ул. Академическая, 16.

Тексты публикуются в авторской версии без редакционных изменений.

ISSN 2224-1752 (печатная версия журнала). EISSN 2224-5502 (электронная версия журнала).

- © Государственное научное учреждение «Институт прикладной физики НАН Беларуси», 2011
- © Республиканское научно-производственное унитарное предприятие «Диатех», 2011

УДК 004.932

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ. ЧАСТЬ 1: НЕЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ ИЗОБРАЖЕНИЙ IMAGE RECONSTRUCTION IN NONLINEAR DYNAMIC TOMOGRAPHY. PART 1: NONLINEAR MODELS OF IMAGES

Наумов А.О., Артемьев В.М. Naumov A.O., Artemiev V.M.

Рассматривается задача моделирования нелинейных динамических изображений на основе многомерных нелинейных стохастических конечно-разностных уравнений марковского типа. Приведены общие соотношения для нахождения математических ожиданий И ковариационных характеристик изображений. Предложен вариант нелинейной модели, состоящий из последовательного соединения линейного гауссова порождающего изображения и его нелинейного преобразования. функционального Приведены примеры моделирования нелинейных динамических изображений. Разработанные модели служат основой для получения алгоритмов реконструкции динамических изображений.

The task of nonlinear dynamic images simulation on the basis of multidimentional nonlinear stochastic finite-difference equations of Markov type is examined. The general relations for estimation of expectation values and covariance characteristics of images are given. The variant of nonlinear model is proposed which consists in consecutive junction of linear Gaussian generative image and its nonlinear functional transformation. The examples of nonlinear dynamic images simulation are shown. The developed models serve as the basis for deriving of dynamic images reconstruction algorithms.

Введение

Вычислительная томография, как средство получения изображений внутренней структуры объектов, нашла широкое применение в медицине, неразрушающем контроле, сейсмографии. Впервые возможности рентгеновской компьютерной томографии были изучены в медицине, и теоретические основы этого способа опубликованы в работах [1, 2]. В дальнейшем это направление было существенно развито и получило применение в других областях науки и техники [3, 4].

Исходными данными для томографии служат результаты проекционных измерений структуры исследуемых объектов. Главной процедурой в компьютерной томографии является реконструкция изображений по этим проекциям. В настоящее время разработано множество различных методов и алгоритмов решения задачи, зависящих от свойств изучаемых объектов и условий наблюдения проекций. В основе методов лежат два основных положения: объекта и представление модели структуры выбор способа реконструкции изображений. Одним из наиболее эффективных способов представления моделей являются случайные поля. задаваемые соответствующими статистическими характеристиками. В этом случае для реконструкции используются статистические методы реконструкции. Выбор модели изображения определяется свойствами объекта. Если они в процессе реконструкции остаются то модель изображения будет статической, неизменными, В противном случае – динамической, т.е. с изменяющимися во времени параметрами.

Когда априорные статистические характеристики модели известны полностью, т.е. задана функция плотности распределения вероятности (ПРВ) его параметров, то используется Байесов подход к [5]. При неполной априорной статистической реконструкции информации используются небайесовы подходы, например такие, как правдоподобия метод максимального [6], метод наименьших квадратов [7], метод максимальной энтропии [8].

Первоначально рассматривались задачи реконструкции изображений сравнительно статических недавно И ЛИШЬ динамических [9]. Для динамических статистических моделей естественным оказалось использование методов реконструкции на основе теории оценивания марковских случайных процессов и полей [10], в частности, теории фильтра Калмана [11]. Однако работы в этом направлении ограничивались рассмотрением случаев линейных большинстве динамических моделей. В практических случаев полей неотрицательными значения физических являются величинами (плотность, концентрация и т.п.). Кроме того, объекты в исследования подвергаться могут внешним процессе ИХ воздействиям, изменяющим их свойства нелинейным образом. Использование нелинейных динамических моделей изображений специальных методов реконструкции. требует разработки настоящее время публикации по решению задач томографической реконструкции нелинейных динамических изображений отсутствуют.

Целью настоящей работы является изложение результатов исследований по этому направлению. Статья состоит из двух частей. В первой предлагаются модели нелинейных динамических изображений на основе многомерных марковских случайных процессов. Во второй – методы их реконструкции по проекциям на основе теории нелинейных фильтров Калмана.

1. Стохастические уравнения нелинейных динамических изображений

Когда В априорных данных выступают качестве лишь математическое ожидание и ковариационная матрица изображения, гауссовым законом распределения линейная модель С то вероятностей яркостей адекватна этому объему информации. В общем случае помимо этих данных может быть задан сам закон распределения яркостей. Учет закона распределения, отличного от гауссова, приводит к необходимости использования нелинейной модели. Нелинейный характер задачи существенно усложняет методы ее решения. Наиболее общий путь построения нелинейной модели случайной использовании марковской заключается В нелинейным векторным стохастическим последовательности С конечно-разностным уравнением (СКРУ). Теория марковских процессов разработана в общем виде, в том числе и для нелинейных задач [12], однако практические методы их решения существенно сложнее линейных и, как правило, являются приближенными.

Рассмотрим нелинейную модель изображения, описываемую СКРУ

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{a}_k(\boldsymbol{x}_k) + \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{w}_k, \qquad (1)$$

где: $a_k(x_k)$, – векторная функция, нелинейно зависящая от фазовых координат (яркостей) изображения x_k ; u_k – векторная регулярная составляющая; w_k – дискретный белый шум с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей Q_k . Уравнение (1) задает марковскую случайную последовательность в дискретном времени k с функцией ПРВ $p(x_{k+1})$, определяемой рекуррентным уравнением

$$p(\boldsymbol{x}_{k+1}) = \int \pi(\boldsymbol{x}_{k+1} | \boldsymbol{x}_k) p(\boldsymbol{x}_k) d\boldsymbol{x}_k$$
(2)

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_

с начальным условием $p_0(x_0)$. Функция плотности вероятности перехода (ПВП) $\pi(x_{k+1} | x_k)$ для процесса (1) с гауссовым белым шумом w_k выражается формулой [12]

$$\pi(\boldsymbol{x}_{k+1} | \boldsymbol{x}_{k}) = \left((2\pi)^{S} \det \boldsymbol{Q}_{k} \right)^{-\frac{1}{2}} \times \\ \times \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\boldsymbol{x}_{k+1} - \boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}_{k}) - \boldsymbol{u}_{k} \right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}_{k}^{-1} \left(\boldsymbol{x}_{k+1} - \boldsymbol{a}(\boldsymbol{x}_{k}) - \boldsymbol{u}_{k} \right) \right].$$
(3)

Последовательно интегрируя уравнение (2) для k = 1, 2, ... с начальным условием $p(\mathbf{x}_0)$, можно найти текущие значения функции ПРВ $p(\mathbf{x}_{k+1})$. Однако решение уравнения (2) для изображений высокой размерности практически труднореализуемо.

Вместо этого решения используют уравнения для вектора математического ожидания $\boldsymbol{m}_{k+1} = \langle \boldsymbol{x}_{k+1} \rangle$ и ковариационной матрицы $\boldsymbol{P}_{k+1} = = \langle (\boldsymbol{x}_{k+1} - \boldsymbol{m}_{k+1}) (\boldsymbol{x}_{k+1} - \boldsymbol{m}_{k+1})^{\mathrm{T}} \rangle$ процесса (1). Усредняя обе его части, находим следующее уравнение для математического ожидания:

$$\boldsymbol{m}_{k+1} = \left\langle \boldsymbol{a}_k(\boldsymbol{x}_k) \right\rangle + \boldsymbol{u}_k, \tag{4}$$

где $\langle a_k(x_k) \rangle = \int a_k(x_k) p(x_k) dx_k$ есть математическое ожидание векторной нелинейной функции $a_k(x_k)$. Это уравнение имеет начальное условие $m_0 = \int x_0 p_0(x_0) dx_0$. Подставив уравнения (1) и (4) в формулу для ковариационной матрицы P_{k+1} и проведя усреднение, получим следующее уравнение:

$$\boldsymbol{P}_{k+1} = \left\langle \boldsymbol{a}_{k}(\boldsymbol{x}_{k}) \cdot \boldsymbol{a}_{k}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{k}) \right\rangle - \boldsymbol{m}_{k} \cdot \boldsymbol{m}_{k}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{k}$$
(5)

с обозначением $\langle a_k(x_k) \cdot a_k^{T}(x_k) \rangle = \int a_k(x_k) \cdot a_k^{T}(x_k) p(x_k) dx_k$. Это уравнение решается с начальным условием $P_0 = \int (x_0 - m_0) (x_0 - m_0)^{T} p_0(x_0) dx_0$.

Таким образом, уравнения (4), (5) в принципе позволяют для любого момента времени k находить математическое ожидание и ковариационную матрицу изображения с нелинейной моделью (1). В то же время в уравнениях (4) и (5) требуется знание функции ПРВ

 $p(\mathbf{x}_{k+1})$. Для приближенного решения можно воспользоваться аппроксимацией этой функции. При учете только вектора математического ожидания и ковариационной матрицы наиболее естественной является гауссова аппроксимация [10]

$$p(\boldsymbol{x}_k) = \left((2\pi)^S \det \boldsymbol{P}_k \right)^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{1}{2} (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{m}_k)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P}_k^{-1} (\boldsymbol{x}_k - \boldsymbol{m}_k) \right].$$
(6)

Тогда уравнения (4), (5) и формула (6) образуют замкнутую систему и служат для приближенного нахождения вектора математического ожидания и ковариационной матрицы нелинейной модели динамического изображения в гауссовом приближении. Решение обратной задачи – нахождение векторной функции $a_k(x_k)$, вектора u_k и матрицы Q_k по заданному закону распределения динамического изображения чрезвычайно сложно.

Обычно в качестве априорных данных имеются лишь одномерные законы распределения фазовых координат изображения. Такое ограничение в задании априорных данных позволяет сузить класс нелинейных моделей, сделав их более удобными для решения задачи реконструкции. Одним из возможных упрощений является использование модели без пространственной динамики, когда каждая из компонент векторной функции $a_k(x_k)$ зависит только от одной координаты, т. е.

$$\boldsymbol{a}_{k}(\boldsymbol{x}_{k}) = [a_{1k}(x_{1k}), a_{2k}(x_{2k}), \dots, a_{Sk}(x_{Sk})]^{\mathrm{T}}.$$

В этом случае *i*-я компонента СКРУ (1) имеет уравнение

$$x_{ik+1} = a_{ik}(x_{ik}) + u_{ik} + w_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, S.$$
(7)

Модель без пространственной динамики приводит к нахождению функции ПРВ каждой компоненты (7) вектора x_{k+1} по отдельности, что упрощает задачу. Так, вместо многомерного уравнения для функции ПРВ (2) приходится решать *S* одномерных уравнений для каждой из компонент.

2. Линейно-нелинейная модель изображения

Предлагается более сложный вариант моделирования случайного динамического изображения путем нелинейного функционального преобразования порождающего гауссова изображения. В результате модель оказывается состоящей из двух частей – линейного блока формирования порождающего гауссова изображения и блока нелинейного функционального преобразования (рис. 1). Такую модель в дальнейшем будем называть линейнонелинейной.

Блок формирования описывается линейным СКРУ $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k$ с формирующими регулярным воздействием \mathbf{u}_k и гауссовым белым шумом \mathbf{w}_k , имеющим ковариационную матрицу \mathbf{Q}_k . В результате порождающее динамическое изображение \mathbf{x}_k размерности *S* имеет гауссово распределение с фазовыми координатами $\mathbf{x}_{1,k}$, $\mathbf{x}_{2,k}$, ..., $\mathbf{x}_{S,k}$, каждая из которых также имеет гауссово распределение.



Рис. 1. Структура линейно-нелинейной модели динамического изображения

В нелинейном блоке вектор x_k подвергается нелинейному функциональному преобразованию в соответствии с формулой $y_{k+1} = f(x_k)$, где $f(x_k)$ есть векторная функция размерности *S*. Таким образом, линейно-нелинейная модель динамического изображения задается системой уравнений

$$\boldsymbol{x}_{k+1} = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{u}_k + \boldsymbol{w}_k, \qquad (8)$$

$$\mathbf{y}_{k+1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k). \tag{9}$$

Размерность этой системы вдвое превышает размерность моделируемого изображения y_{k+1} , т. е. равна 2*S*. Выбором нелинейной функции $f(x_k)$ можно добиться желаемого закона распределения

яркости. При нелинейных функциональных преобразованиях свойства марковости процесса **у**_{k+1} не нарушаются [12], поэтому линейно-нелинейная модель также является марковской. Приведем некоторые общие для нее соотношения.

Используя уравнение (4), из уравнения (8) получаем уравнение для математического ожидания гауссова порождающего изображения

$$\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{x},k+1} = \boldsymbol{A}_k \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{x},k} + \boldsymbol{u}_k. \tag{10}$$

Используя уравнения (5) и (10), для ковариационной матрицы $P_{x,k} = \langle (x - m_{x,k})(x - m_{x,k})^{\mathrm{T}} \rangle$, имеем уравнение

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},k+1} = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{k}} \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{x},\boldsymbol{k}} \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{k}}^{\mathrm{T}} + \boldsymbol{Q}_{\boldsymbol{k}}.$$
 (11)

Решая эти уравнения, можно для каждого момента времени найти гауссов закон распределения порождающего изображения

$$p_{\mathbf{x}}(\mathbf{x}_{k}) = \left((2\pi)^{S} \det \mathbf{P}_{\mathbf{x},k} \right)^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{m}_{\mathbf{x},k})^{T} \mathbf{P}_{\mathbf{x},k}^{-1} (\mathbf{x}_{k} - \mathbf{m}_{\mathbf{x},k}) \right].$$
(12)

Математическое ожидание выходных координат y_{k+1} модели равно

$$\boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},\boldsymbol{k}+1} = \int_{-\infty}^{\infty} \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k}}) \boldsymbol{p}_{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k}}) \mathrm{d}\boldsymbol{x}_{\boldsymbol{k}}, \qquad (13)$$

а ковариационная матрица может быть определена по формуле

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y},k+1} = \int_{-\infty}^{\infty} \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},k+1} \right) \left(\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},k+1} \right)^{\mathrm{T}} \boldsymbol{p}_{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{x}_k) \mathrm{d} \boldsymbol{x}_k.$$
(14)

Рассмотрим случай одномерных нелинейностей, когда каждая фазовая координата y_i уравнения (9) зависит только от одной из координат x_i , т. е. нелинейное преобразование есть векторная функция $f(x) = [f_1(x_1), f_2(x_2), ..., f_s(x_s)]^T$. Ограничимся рассмотрением лишь непрерывно-дифференцируемых функций $f_i(x_i)$. При этом формула для нахождения закона распределения нелинейного преобразования имеет следующий вид [13]:

$$p_{y_i}(y_i) = \sum_{r=1}^{l} p_{x_r} \left(f_r^{-1}(y_i) \right) \left| \left(f_r^{-1}(y_i) \right)' \right|,$$
(15)

где $f_r^{-1}(y_i)$ – функции, обратные $f_i(x_i)$ для всех l диапазонов неоднозначности с заменой x_i на y_i , $(f_r^{-1}(y_i))' = df_r^{-1}(y_i)/dy_i$, а |...| есть обозначение модуля соответствующей функции. Выделим два наиболее типичных варианта: случай положительной монотонной случай положительной $f_i(x_i)$ И четной функции функции $f_i(x_i) = f_i(-x_i)$, имеющей один экстремум. Подобные функции позволяют формировать достаточно широкий набор функций ПРВ $p_{y_i}(y_i)$. При монотонной нелинейной функции формула (15) принимает особенно простой вид:

$$p_{y_i}(y_i) = p_{x_i}(f_i^{-1}(y_i)) \left| (f_i^{-1}(y_i))' \right|.$$

Для двузначной четной функции она выражается следующим образом:

$$p_{y_i}(y_i) = \left[p_{x_i}(f_i^{-1}(y_i)) + p_{x_i}(-f_i^{-1}(y_i)) \right] \left| (f_i^{-1}(y_i))' \right|.$$

С помощью указанных нелинейных преобразований можно сформировать по крайней мере три вида функций ПРВ $p_{y}(y)$ (индекс і опущен). При использовании монотонной функции формируемая ПРВ начинается с нуля (табл. 1, пример 1). Для четных функций с ненулевым значением производной в точке x = 0 формируемая ПРВ при x = 0 имеет конечное ненулевое значение (табл. 1, пример 2). Для четных функций с нулевой производной в начале координат формируемая ПРВ начинается в бесконечности (табл. 1, пример 3). Существует формирования функции ПРВ возможность С ограниченным диапазоном изменения переменной (табл. 1, пример 4).

	$p_{x}(x) = (2\pi\sigma_{x}^{2})^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-(x-m_{x})^{2}/2\sigma_{x}^{2}\right), \ \Phi(z) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_{0}^{z} \exp\left(-\frac{1}{2}t^{2}\right) dt$					
	y = f(x)		$p_{y}(y)$			
1	$e^{\alpha(x-a)}$		$cy \cdot \exp[-(2\sigma_x^2 \alpha^2)^{-1} \times \\ \times (\ln y + \alpha(a - m_x))^2];$ $c = \alpha (2\pi \sigma_x^2)^{-\frac{1}{2}}$			
2	x		$c \cdot \exp\left[-\frac{(x-m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right];$ $c = \frac{\left(\frac{1}{2} + \Phi(m_x / \sigma_x)\right)^{-1}}{2\pi\sigma_x^2}$			
3	x^2		$cy^{-\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[-\frac{y+m_x^2}{2\sigma_x^2}\right] \times \\ \times ch\left[\frac{y^{\frac{1}{2}}m_x}{\sigma_x^2}\right]; \\ c = (2\pi\sigma_x^2)^{-\frac{1}{2}}$			
4	$\frac{x}{\sqrt{1+\alpha^2 x^2}}$		$c \cdot \exp\left[-\frac{\left(y(1-\alpha^{2}y^{2})^{-\frac{1}{2}}-m_{x}\right)^{2}}{2\sigma_{x}^{2}}\right];$ $c = \left(2\pi\sigma_{x}^{2}\right)^{-\frac{1}{2}}\left(1-\alpha^{2}y^{2}\right)^{-\frac{3}{2}};$ $-\alpha^{-1} \le y \le a^{-1}$			

Таблица 1. Примеры формирования функций ПРВ при нелинейном преобразовании гауссовых случайных величин

Для модели с одномерной нелинейностью выражения для ожидания математического ковариационных характеристик И упрощаются. Усредним обе части уравнения (9). существенно $f_{S}(x_{Sk})^{\mathrm{T}}$, $f(\mathbf{x}_{k}) = [f_{1}(\mathbf{x}_{1k}), f_{2}(\mathbf{x}_{2k}), ...,$ то Поскольку усреднению подвергается каждая компонента в отдельности с одномерным нормальным законом распределения. Для і-й компоненты вектора математического ожидания имеем уравнение

$$m_{yi,k+1} = \left\langle f_i(x_{i,k}) \right\rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f_i(x_{i,k}) (2\pi p_{ii,k})^{-\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{(x_{i,k} - m_{xi,k})^2}{2p_{ii,k}}\right] dx_{i,k}, \quad (16)$$

где $m_{xi,k}$ есть *i*-я компонента вектора математического ожидания (10), а $p_{ii,k}$ – *i*-й диагональный элемент ковариационной матрицы порождающего изображения (11). В итоге вектор математического ожидания модели изображения $m_{y,k+1} = [m_{y1,k+1}, m_{y2,k+1}, ..., m_{ys,k+1}]^{T}$ будет состоять из компонент (16). В общем случае интеграл (16) для i = 1, 2, ..., S может быть найден численно. В некоторых частных случаях этот интеграл выражается через элементарные функции (табл. 2, столбец m_y).

Таблица 2. Математические ожидания и дисперсии случайных величин при нелинейных преобразованиях

	$p_{x}(x) = (2\pi\sigma_{x}^{2})^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-(x-m_{x})^{2}/2\sigma_{x}^{2}\right), \ \Phi(z) = (2\pi)^{-\frac{1}{2}} \int_{0}^{z} \exp\left(-\frac{1}{2}t^{2}\right) dt$						
	y = f(x)	m_y	σ_y^2				
1	$e^{\alpha(x-a)}$	$\exp\left(\alpha(m_x-a)+\frac{1}{2}\alpha^2\sigma_x^2\right)$	$m_{y}\left(\exp\left(\alpha(m_{x}-a)\right)-1\right)$				
2	x	$(2\sigma_x^2 / \pi)^{\frac{1}{2}} \exp(-m_x^2 / 2\sigma_x^2) + +2m_x \Phi(m_x / \sigma_x)$	$\sigma_x^2 + m_x^2 - m_y^2$				
3	x^2	$\sigma_x^2 + m_x^2$	$2\sigma_x^2(\sigma_x^2+2m_x^2)$				

На основе (9) запишем уравнение для случайной составляющей вектора y_{k+1}

$$\overset{\circ}{\boldsymbol{y}}_{k+1} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_k) - \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},k+1}.$$

Используя его, получим формулу для ковариационной матрицы модели изображения

$$\boldsymbol{P}_{\boldsymbol{y},k+1} = \left\langle \boldsymbol{y}_{k+1} \cdot \boldsymbol{y}_{k+1}^{\mathrm{T}} \right\rangle = \left\langle \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}_{k}) \cdot \boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}_{k}) \right\rangle - \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},k+1} \cdot \boldsymbol{m}_{\boldsymbol{y},k+1}^{\mathrm{T}}.$$
 (17)

Первое слагаемое в правой части есть матрица с элементами $\langle f_i(x_{i,k}) \cdot f_j(x_{j,k}) \rangle$, *i*, *j* = 1, 2, ..., *S*, которые вычисляются по формуле

$$\langle f_i(\boldsymbol{x}_{i,k}) \cdot f_j(\boldsymbol{x}_{j,k}) \rangle = \int f_i(\boldsymbol{x}_{i,k}) \cdot f_j(\boldsymbol{x}_{j,k}) p_x(\boldsymbol{x}_k) d\boldsymbol{x}_k,$$
 (18)

где $p_x(x_k)$ есть гауссова функция ПРВ (12) порождающего изображения. Диагональные элементы ковариационной матрицы $P_{y,k+1}$ есть дисперсии соответствующих координат вектора y_{k+1} . Для некоторых видов функций y = f(x) значения дисперсий σ_y^2 могут быть получены в явном виде (табл. 2, столбец σ_y^2). Получение ковариационной матрицы (18) в явном виде также возможно в ряде частных случаев.

Несмотря на некоторые упрощения, аналитически решить обратную задачу нахождения функций $f_i(x_i)$ по заданной ПРВ $p_y(y_i)$ трудно, т. к. это приводит к необходимости решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. На практике приходится аппроксимировать желаемую ПРВ функцией из заданного класса (например, приведенных в табл. 1) и выбирать ее параметры исходя из желаемых математического ожидания и дисперсии (например, используя формулы из табл. 2).

3. Пример моделирования нелинейных динамических изображений

Рассмотрим два примера моделирования изображений на основе линейно-нелинейной модели с одномерной нелинейностью. На рис. 2 *а* приведены реализации порождающего гауссова изображения для трех моментов времени *k*. В первом случае полагаем, что порождающее изображение подвергается нелинейному преобразованию вида

$$\boldsymbol{y}_{k+1} = \exp(\alpha \boldsymbol{x}_k), \quad \alpha = 0, 5.$$
⁽¹⁹⁾

Данное преобразование обеспечивает положительную определенность значениям рабочего изображения с функцией ПРВ яркости, приведенной в табл. 1, пример 1. Реализации нелинейного динамического изображения такого типа показаны на рис. 2 б.

Во втором случае рассмотрим нелинейное преобразование

$$y_{k+1} = x_k \left(1 + (x_k)^2 \right)^{-\frac{1}{2}},$$
 (20)

которое позволяет учесть ограниченный динамический диапазон яркости (табл. 2, пример 4). Этот тип изображений приводится на рис. 2 *в*.







Рис. 2. Реализации порождающего гауссова изображения (*a*) и реализации изображений, полученных путем нелинейного преобразования порождающего функциями (19) (*б*) и (20) (*в*)

Чтобы подтвердить справедливость модельных результатов, методом статистических испытаний (по 1000 реализациям) получены функции ПРВ порождающего изображения (рис. 3 *а*), нелинейного изображения с функцией преобразования (19) (рис. 3 б) и нелинейного изображения с функцией преобразования (20) (рис. 3 в).



Рис. 3. Функции ПРВ для моделей изображений, приведенных на рис. 2: порождающего (*a*); нелинейного с функцией преобразования (19) (*б*); нелинейного с функцией преобразования (20) (*в*)

Соответствующие им теоретические функции ПРВ приведены в таблице 1. Результаты на рис. 3 демонстрируют совпадение экспериментальных данных с желаемыми теоретическими.

Заключение

томография объектов с изменяющейся Динамическая BO времени структурой находит широкое применение в медицине, неразрушающем контроле, сейсмографии и других областях. Она основана на реконструкции по проекциям и в ряде случаев использует статистические методы обработки. Значительный интерес представляют когда статистические характеристики задачи, изображений являются негауссовыми представляются И нелинейными моделями. Для описания нелинейных случайных динамических полей предлагается использовать нелинейные СКРУ марковского типа. Приведены общие соотношения для нахождения их математических ожиданий и ковариационных характеристик.

Предложен вариант нелинейной модели, состоящий из последовательного соединения линейной гауссовой модели порождающего изображения и его последующего нелинейного функционального преобразования. Такая модель названа линейнонелинейной. Выбором параметров линейной части можно добиться желаемых ковариационных и корреляционных характеристик изображения, а выбором функции нелинейного преобразования можно обеспечить необходимый закон распределения, отличный от гауссова. Рассмотрены модели с типовыми нелинейными функциями и получены выражения для нахождения их математических ожиданий и ковариационных функций. Приведены примеры моделирования нелинейных случайных динамических изображений.

Разработанные модели служат основой для получения алгоритмов реконструкции динамических изображений.

Литература

- 1. Херман Г. Восстановление изображений по проекциям: Основы реконструктивной томографии. М.: Мир, 1983.
- 2. Наттерер Ф. Математические аспекты компьютерной томографии. М.: Мир, 1990.
- 3. Клюев В. В. (ред.) Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник. М.: Машиностроение, 1995.
- 4. Halmshaw R. Industrial Radiology. Theory and Practice. London: Chapman & Hall, 1995.
- 5. Herman G. T., Lent A. A Computer Implementation of a Bayesian Analysis of Image Reconstruction // Information and Control. 1976. Vol. 31. P. 364—384.
- 6. Lange K., Bahn M., Little R. A Theoretical Study of Some Maximal Likelihood Algorithms for Emission and Transmission Tomography // IEEE Trans. Med. Im. 1987. Vol. MI-6. № 2. P. 106—114.
- 7. Helstrom C. W. Image Restoration by the Method of Least Squares // J. Opt. Soc. Amer. 1967. Vol. 57. № 3. P. 297—303.
- 8. Wernece S. T., D'Addario L. Maximum Entropy Image Reconstruction // IEEE Trans. Com. 1977. Vol. 26. No. 4. P. 351—364.
- 9. Beck M. S., Dyakowski T., Williams R. A. Process Tomography the State of the Art // Trans. Inst. Meas. Control. 1998. Vol. 20. P. 163—177.
- 10. Ярлыков М. С., Миронов М. А. Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.
- 11. Chui C. K., Chen G. Kalman Filtering with Real-Time Applications. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- 12. Стратонович Р. Л. Условные марковские процессы и их применение к теории оптимального управления. М.: МГУ, 1966.
- 13. Пугачев В.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1960.

Статья поступила в редакцию 21.03.12

УДК 620.179.14

ИНФОРМАТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЛЯ МАГНИТНОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАКАЛКИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ У8А

INFORMATIVE PARAMETERS FOR MAGNETIC TESTING GRADE OF HARDENING TOOL CARBON STEEL Y8A

Короткевич З.М. Korotkevich Z.M.

На основе анализа влияния температуры закалки на структуру и магнитные свойства инструментальной углеродистой стали У8А, измеренные в квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи, предложены новые информативные параметры для магнитного контроля, позволяющие достоверно выявлять как недогрев, так и перегрев при закалке данной стали.

Based on the analysis of the influence of hardening temperature on the structure and magnetic properties of tool carbon steel Y8A measured in the quasistatic remagnetization mode in a closed magnetic circuit, the new informative parameters for the magnetic testing which allow to reliably detect both subcooling and superheat during hardening of the steel are proposed.

Введение

Инструментальная углеродистая сталь У8А широко используется на машиностроительных предприятиях для изготовления инструментов, работающих в условиях, не вызывающих существенный разогрев режущей кромки, подвергающихся ударам и толчкам и требующих достаточной вязкости при умеренной твердости (метчиков ручных, рашпилей, надфилей, пил для обработки древесины, гладких калибров, топоров, зубил, клейм, кузнечного оборудования, матриц для холодной штамповки) [1].

Особенностью инструментальных углеродистых сталей, к которым относится и эвтектоидная сталь У8А, является высокая чувствительность к перегреву под закалку, проблема неразрушающего контроля которого для данного класса сталей является весьма важной и до настоящего времени в полной мере не решенной [2, 3].

Структурное состояние изделий из инструментальных углеродистых сталей при недогреве под закалку хорошо выявляется по большинству стандартных магнитных характеристик. Однако перегрев под закалку этих сталей выявить по стандартным магнитным характеристикам практически невозможно [4]. Поэтому поиск новых информативных параметров для контроля температурного режима закалки инструментальных углеродистых сталей и, в частности, стали У8А, является весьма актуальной задачей.

В настоящей работе приводятся результаты исследований возможности использования комбинаций стандартных магнитных характеристик инструментальной высококачественной углеродистой стали У8А, измеренных при квазистатическом перемагничивания в замкнутой магнитной цепи, для однозначного определения температуры, при которой проводилась закалка данной стали.

Режимы термообработки и методика измерений. Химический состав стали У8А представлен в таблице 1.

Массовая доля элемента, %								
Иплорода	Кремния	Марганца	Серы	Фосфора				
углерода			не более					
0,75-0,84	0,17-0,33	0,17-0,28	0,018	0,025				

Таблица 1. Химический состав стали У8А (ГОСТ 1435-99) [5]

Помимо перечисленных в таблице 1 химических элементов сталь У8А может содержать до 0,40 % Cr, до 0,25 % Ni и до 0,25 % Cu.

Сталь У8А прокатывают при температуре выше критической точки A_{Cm} (765 °C). Поэтому после охлаждения она принимает структуру пластинчатого перлита различной дисперсности, что приводит к повышенной твердости и плохой обрабатываемости резанием. Для снижения твердости и улучшение обрабатываемости резанием сталь У8А подвергается отжигу и приобретает структуру зернистого перлита (смесь феррита с цементитом). Данная структура позволяет применять накатку, насечку и другие высокопроизводительные технологические процессы изготовления инструмента благодаря их невысокой твердости (не более 187 НВ) в отожженном состоянии и получать при последующей термообработке наиболее однородные свойства. Оптимальная температура отжига должна превышать критическую точку A_{c1} на 10–20 °C (для стали У8А $A_{c1} = 730$ °C) [5, 6].

Для получения твердости 48–51 HRC эвтектоидную сталь У8А следует нагревать под закалку на 30–50 °С выше критической точки A_{C3} и подвергать низкотемпературному отпуску на троостит [7]. Рекомендуемые режимы термообработки стали У8А: температура нагрева

под закалку T_{3ak} = 780–800 °C (HRC 63–65) и температура отпуска T_{0TR} = 275–350 °C (HRC 48–51). Закалочная среда – вода, отпуск проводится на воздухе. При закалке в масле T_{3ak} повышают на 20 °C [5].

Большим недостатком эвтектоидной стали У8А, как и других инструментальных углеродистых сталей, является узкий интервал закалочных температур и необходимость закалки с охлаждением в воде (вследствие низкой прокаливаемости). Однако закалка в воде усиливает деформацию и коробление инструмента и приводит к образованию трещин, а превышение температуры нагрева под закалку на 10– 15 °C сверх рекомендуемой по [5] сильно снижает прочность и вязкость, что связано с ростом зерна аустенита [8].

Для защиты от окисления и обезуглероживания целесообразно нагрев под закалку инструмента из стали У8А диаметром до 120 и длиной до 250 мм проводить в соляных ваннах (72 % BaCl₂ + 28 % NaCl). При нагреве более крупного инструмента в камерных печах без защитной атмосферы необходимо применять упаковочные материалы. Для сталей с температурой закалки до 900 °C в качестве упаковочного материала используется древесный уголь + карбюризатор или смесь свежей и пережженной чугунной стружки [8].

Сталь У8А имеет малую прокаливаемость (10–12 мм даже при охлаждении в воде) из-за малой устойчивости переохлажденного аустенита. Поэтому прокаливаться насквозь после закалки в воде могут только изделия малого диаметра или малой толщины. Время выдержки под закалку на 1 мм диаметра (толщины) изделия из стали У8А составляет: 20–35 с при нагреве в ванне и 50–80 с при нагреве в печи [8].

Измерение магнитных свойств образцов стали У8А осуществляли в квазистатическом режиме перемагничивания в замкнутой магнитной цепи (на кольцевых образцах) на установке УИМХ [9]. Поэтому размеры кольцевых образцов для исследований были выбраны в соответствии с рекомендациями [9] и составляли: внешний диаметр 17 мм; внутренний диаметр 13,2 мм, высота 10 мм. С учетом этих же рекомендаций были выбраны и параметры намагничивающей и измерительной обмоток. Частота перемагничивания составляла 0,05 Гц.

Для получения при закалке стали У8А разной структуры металла (недогрев под закалку, рекомендуемая температура нагрева по ГОСТ и перегрев под закалку) нагрев образцов проводился при температурах 710, 740, 770, 790, 820, 850 и 880 °С в среде, защищающей металл от обезуглероживания. Исходя из толщины боковой стенки образцов, время выдержки при нагреве под закалку было выбрано равным 10 минутам. Охлаждение проводилось в воде. Анализ стандартных магнитных характеристик. По основной кривой намагничивания определялись: максимальная намагниченность M_m ; начальная $\mu_{\rm H}$ и максимальная μ_m магнитные проницаемости; напряженность намагничивающего поля $H_{\mu m}$ при котором достигается μ_m ; намагниченности $M_{\mu m}$, M_{Hc} и M_{2Hc} при магнитном поле, равном $H_{\mu m}$, коэрцитивной силе H_c и двум коэрцитивным силам $2H_c$ соответственно.

По предельной петле магнитного гистерезиса определялись: остаточная намагниченность M_r ; коэрцитивная сила H_c ; релаксационная коэрцитивная сила H_r ; релаксационная намагниченность M_{Hr} ; остаточная намагниченность M_{rc} после снятия поля, равного H_c ; максимальная дифференциальная магнитная проницаемость μ_{dm} и дифференциальная магнитная проницаемость μ_{dHc} при размагничивающем поле, равном коэрцитивной силе H_c ; напряженность намагничивающего поля $H_{\mu dm}$, соответствующая максимуму дифференциальной магнитной проницаемости.

По результатам измерений рассчитывалась намагниченность насыщения M_s (по закону подхода к насыщению), релаксационная магнитная проницаемость $\mu_r = M_{Hr}/H_r + 1$ и магнитная проницаемость на кривой возврата от коэрцитивного поля $\mu_{rc} = M_{rc}/H_c + 1$.

Поведение стандартных магнитных характеристик. Зависимости стандартных магнитных характеристик образцов из стали У8А, закаленных от разных температур, представлены на рисунке 1. Штриховыми линиями указан рекомендуемый диапазон температур нагрева под закалку [5].

Изменения магнитных свойств эвтектоидной углеродистой инструментальной стали У8А при закалке от разных температур обусловлены мартенситным превращением.

Нагрев образцов под закалку до температуры 710 °С существенных структурных изменений и фазовых превращений в стали У8А не вызывает [3]. Поэтому большинство ее магнитных характеристик и твердость в данном диапазоне температур нагрева под закалку изменяются незначительно.

Увеличение нагрева под закалку свыше точки *A*_{*C*1} обуславливает появление мартенсита – более жесткой в магнитном отношении и в отношении твердости фазы, что вызывает заметное изменение магнитных, электрических свойств и твердости стали У8А.



Рис. 1. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемагничивании от температуры нагрева под закалку

Так, при закалке испытуемых образцов от температуры 740 °С наблюдается убыль на 4 % намагниченности насыщения M_s и на 7 % максимальной намагниченности M_m , что связано с увеличением в структуре закаленной стали немагнитной фазы (остаточного аустенита). Остаточная намагниченность M_r при этом изменяется очень незначительно.

Рост по отношению к исходному состоянию коэрцитивной силы H_c в 5,2 раза, релаксационной коэрцитивной силы H_r в 5,4 раза, напряженностей $H_{\mu m}$ в 4,5 раза и $H_{\mu dm}$ в 6,2 раза и уменьшение магнитных проницаемостей $\mu_{\rm H}$, μ_m , μ_r и μ_{rc} на 50–76 %, а μ_{dm} и μ_{dHc} – на 81–82 % обусловлены появлением в стали мартенсита, являющегося более жесткой в магнитном и более твердой в механическом отношениях фазой по сравнению с исходной структурой (перлит + цементит).

Увеличение намагниченностей M_{Hc} , $M_{\mu m}$, M_{2Hc} , M_{Hr} и M_{rc} при закалке от 740 °С (по сравнению с исходным состоянием металла) во многом связано со значительным ростом соответствующих им полей $(H_c, H_{\mu m}, 2H_c, H_r)$.

При нагреве под закалку свыше 740 °С намагниченность M_s насыщения и максимальная намагниченность M_m продолжают убывать до 770 °С. Для других видов намагниченности (M_r , M_{rc} , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ и M_{Hr}) в области температур 780–800 °С наблюдаются небольшие максимумы. Значения коэрцитивной силы H_c , релаксационной коэрцитивной силы H_r , напряженностей $H_{\mu m}$ и $H_{\mu dm}$ намагничивающего и перемагничивающего поля продолжают расти до температуры 770 °С так, что по сравнению с исходным состоянием их рост составляет от 4,1 до 5,6 раз.

Нагрев образцов под закалку свыше 770 °С резко замедляет скорость изменения всех магнитных характеристик стали У8А, что связано с увеличением количества остаточного аустенита и увеличением областей остаточного аустенита до размеров больших средней толщины доменных границ [10]. Все виды намагниченности (M_s , M_r , M_m , M_{rc} , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$ и M_{Hr}) и магнитной проницаемости ($\mu_{\rm H}$, μ_m , μ_r , μ_{rc} , μ_{dm} и μ_{dHc}) плавно уменьшаются. Значение коэрцитивной силы H_c стабилизируется, а изменения находятся в пределах ошибки измерений. Для релаксационной коэрцитивной силы H_r , напряженности $H_{\mu m}$ и намагниченности $H_{\mu m}$ наблюдается небольшой рост.

Анализ зависимостей перечисленных выше магнитных параметров от температуры закалки стали У8А показывает, что недогрев под закалку исследуемой стали надежно выявляется по ряду стандартных магнитных характеристик (M_{Hr} , M_{rc} , H_c , H_r , $H_{\mu m}$, $H_{\mu dm}$, μ_m , μ_{dHc} и μ_{dm}). Другие магнитные характеристики слабо чувствительны к недогреву под закалку (M_s , M_m , M_r , M_{Hc} , M_{2Hc} , $M_{\mu m}$, μ_{H} , μ_r и μ_{rc}).

На перегрев под закалку реагируют M_m , $H_{\mu m}$, $H_{\mu dm}$ μ_{dm} и μ_{dHc} . Однако чувствительность этих характеристик к перегреву под закалку невысока. Другие магнитные характеристики либо нечувствительны к перегреву образцов под закалку (H_c , H_r , μ_m , μ_H , μ_r и μ_{rc}), либо по ним трудно отличить структурное состояние металла, перегретого под закалку, от недогретого (M_r , M_{Hr} , M_r , M_{Hr} , M_{rc} ,).

Поэтому для повышения чувствительности контроля перегрева под закалку стали У8А необходимы иные информативные параметры.

Информативные параметры для контроля. Повысить надежность выявления перегрева под закалку изделий из стали У8А можно за счет измерения несколько магнитных характеристик. Так в [10] для этой цели рекомендуется использовать два параметра: коэрцитивную силу H_c и намагниченность насыщения M_s или коэрцитивную силу H_c и релаксационную магнитную проницаемость μ_r . Однако при перегреве стали У8А под закалку ее коэрцитивная сила почти не изменяется, а чувствительности намагниченности насыщения и релаксационной проницаемости к превышению температуры нагрева рекомендуемой величины также невысока.

В качестве информативных параметров для контроля перегрева под закалку стали У8А рассматривали сумму, разность, произведение и частное от деления друг на друга стандартных магнитных характеристик этой стали. Арифметические операции проводили над значениями исследуемых стандартных характеристик относительно исходного состояния стали до закалки (рисунок 2). При исследовании новых информативных параметров учитывали необходимость сохранения их чувствительности к недогреву под закалку. Учитывали также рекомендации, данные в [10], согласно которым от магнитных характеристик, определяемых на кривой намагничивания и имеющих аналоги на предельной петле магнитного гистерезиса и кривой возврата, можно отказаться, поскольку точность их определения существенно зависит от качества размагничивания контролируемых изделий. Принимали во внимание также и сложность измерения той или иной магнитной характеристики.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ



Рис. 2. Зависимость магнитных параметров стали У8А при квазистатическом перемагничивании от температуры нагрева под закалку в относительных единицах Разность параметров с высокой чувствительностью к недогреву под закалку и имеющих тенденцию к снижению значений с увеличением температуры закалки сверх рекомендуемой позволяет получить информативные параметры, обеспечивает контроль проведенной закалки во всем возможном диапазоне изменения температуры нагрева. Наиболее чувствительными в диапазоне температур 740–880 °С являются параметры U_1 - U_4 :

$$U_{1} = H_{\mu dm} - \mu_{dm}; \quad U_{2} = H_{\mu dm} - \mu_{dHc};$$

$$U_{3} = H_{r} - M_{Hc}; \quad U_{4} = H_{c} - M_{Hc}.$$
(1)

Зависимости параметров U_1-U_4 от температуры нагрева под закалку представлены на рисунке 3, а. Средняя чувствительность в диапазоне температур нагрева 740–880 °C составляет: 3,2 %/°C для U_1 и U_2 ; 1,4 %/°C для U_3 ; 1,6 %/°C для U_4 . Исходя из наибольшей чувствительности и технической возможности измерений магнитных характеристик из данной группы, наиболее предпочтительным для контроля недогрева под закалку являются параметр U_1 и U_2 . Вследствие невысокой чувствительности в диапазоне 790–880 °C, которая составляет 0,2 и 0,3 %/°C соответственно, использование этих параметров для контроля перегрева под закалку нецелесообразно.

Очевидным условием повышения чувствительности при использовании в качестве информативного параметра суммы относительных значений магнитных характеристик является их рост или убыль с изменением температуры нагрева под закалку.

Суммирование дает наилучшие результаты для сочетаний $H_{\mu dm}$, $H_{\mu m}$, H_r и H_c . Зависимости информативных параметров U_5 – U_9 , где

$$U_{5} = H_{\mu dm} + H_{r}; \quad U_{6} = H_{r} + H_{c}; \quad U_{7} = H_{\mu dm} + H_{\mu m};$$

$$U_{8} = H_{r} + H_{\mu m}; \quad U_{9} = H_{c} + H_{\mu m}.$$
(2)

от температуры нагрева под закалку представлены на рисунке 3, б (штриховыми линиями указан рекомендуемый диапазон температур нагрева под закалку [5]). Чувствительность этих параметров к недогреву под закалку в диапазоне температур нагрева 740–880 °C составляет: 4,4 %/°C для U_5 ; 3,0 %/°C для U_6 и U_8 ; 4,7 %/°C для U_7 ; 3,2 %/°C для U_9 . Однако для установления перегрева эти параметры непригодны, так как их средняя чувствительность в диапазоне 790–880 °С составляет 0,1–0,4 %/°С.

Перемножение стандартных параметров по сравнению с их суммированием позволяет повысить величину значений информативных параметров в несколько раз. Наиболее результативными комбинациями магнитных параметров при перемножении являются $U_{10}-U_{15}$, где

$$U_{10} = H_{\mu dm} \cdot H_{r}; \quad U_{11} = H_{\mu dm} \cdot H_{c}; \quad U_{12} = H_{\mu dm} \cdot H_{\mu m};$$

$$U_{13} = H_{r} \cdot H_{c}; \quad U_{14} = H_{c} \cdot H_{\mu m}; \quad U_{15} = H_{r} \cdot H_{\mu m}.$$
(3)



Рис. 3. Зависимость информационных параметров U₁ – U₂₁ стали У8А от температуры нагрева под закалку

Чувствительность данных параметров во всем диапазоне температур (710–880 °C) составляет от 12,4 %/°C для U_{14} до 17,5 %/°C для U_{10} . Эти информационные параметры имеют более высокую чувствительность к перегреву под закалку в диапазоне 790–880 °C 1,6 %/°C для U_{10} ; 0,7 %/°C для U_{11} ; 2,1 %/°C для U_{12} ; 0,6 %/°C для U_{13} ; 1,1 %/°C для U_{14} ; 1,8 %/°C для U_{15} . Информационные параметры, полученные путем перемножения магнитных характеристик, представлены на рисунке 3, в.

Наилучшие результаты получаются при использовании в качестве информативного параметра частного от деления относительных величин коэрцитивной силы H_c , релаксационной коэрцитивной силы H_r и напряженности $H_{\mu m}$ на относительные величины магнитных проницаемостей μ_{dm} и μ_m , что связано с увеличением полевых характеристик с ростом температуры нагрева под закалку и уменьшением магнитных проницаемостей.

При делении информативные параметры имеют вид (рисунок 3, г):

$$U_{16} = \frac{H_r}{\mu d_m}; \ U_{17} = \frac{H_c}{\mu d_m}; \ U_{18} = \frac{H_r}{\mu_m}; \ U_{19} = \frac{H_c}{\mu_m}; \\ U_{20} = \frac{H_{\mu m}}{\mu d_m}; \ U_{21} = \frac{H_{\mu m}}{\mu_m}.$$

$$(4)$$

Средняя чувствительность этих параметров к температуре закалки в диапазоне 740–880 °С составляет: 15,9 %/°С для U_{16} ; 15,3 %/°С для U_{17} ; 12,1 %/°С для U_{18} ; 11,6 %/°С для U_{19} ; 13,4 %/°С для U_{20} и 10,2 %/°С для U_{21} . Чувствительность к недогреву (710–790 °С) этих же параметров изменяется от 17,3 %/°С для U_{21} до 22,2 %/°С для U_{16} . Для этих параметров так же характерна и высокая чувствительность к перегреву под закалку (790–880 °С) 10,3 %/°С для U_{16} ; 9,3 %/°С для U_{17} ; 4,1 %/°С для U_{18} ; 3,4 %/°С для U_{19} ; 9,2 %/°С для U_{20} и 3,9 %/°С для U_{21} .

Таким образом, для неразрушающего контроля температуры закалки инструментальной углеродистой стали У8А можно рекомендовать в качестве информативного параметра частное от деления релаксационной коэрцитивной силы на максимальное значение дифференциальной магнитной проницаемости.

Выводы

Наиболее чувствительными информативными параметрами для контроля качества проведенной закалки во всем диапазоне возможных температур нагрева под закалку являются частные от деления коэрцитивной силы H_c и релаксационной коэрцитивной силы H_r на максимальную дифференциальную магнитную проницаемость μ_{dm} .

Литература

- 1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Металловедение. М.: Машиностроение. 1980. 493 с.
- 2. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. 184 с.
- 3. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
- 4. Матюк В.Ф., Бурак В.А., Короткевич З.М., Осипов А.А. Влияние температур закалки и отпуска на структуру и магнитные свойства инструментальных углеродистых сталей. – Неразрушающий контроль и диагностика, 2012, № 1, с. 25–49.
- 5. Прутки, полосы и мотки из инструментальной нелегированной стали. Общетехнические технические условия: ГОСТ 1435-99. – Введ. 01.09.2001. – Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001. – 21 с.
- 6. Ильин С.И., Корягин Ю.Д. Технология термической обработки сталей. Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2009. – 120 с.
- 7. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Металловедение. М.: Машиностроение. 1980. 493 с.
- 8. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. М.: Металлургия, 1968. 568 с.
- 9. Матюк В.Ф., Осипов А.А. Установка УИМХ для измерения магнитных характеристик магнитомягких материалов и изделий. – Дефектоскопия, 2007, № 3, с. 12– 25.
- 10. Горкунов Э.С., Костин В.Н., Тартачная М.В., Глазистов А.Г., Шалаев В.Н. Магнитный контроль изделий из сталей 7Х3, 9ХФ, 50ХНМ, У10А после низко– и среднетемпературного отпуска. – Дефектоскопия, 1990, № 1, с. 70–76.

Статья поступила в редакцию 10.05.12

ПРИБОРЫ МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО ОДНОПОЛЯРНОГО ИМПУЛЬСНОГО НАМАГНИЧИВАНИЯ Instruments of magnetic structurescopy based on the local monopolar pulse magnetization

Матюк В.Ф. *Matyuk V.F.*

Описан принцип работы, устройство, назначение и технические характеристики приборов, реализующих импульсный метод магнитной структуроскопии с использованием однополярного намагничивания. Рассмотрены особенности приборов типа ИМА, созданных на протяжении ряда лет в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси. Созданные приборы позволяют обеспечить требуемый уровень качества выпускаемой продукции, являются одним из элементов ресурсосбережения, успешно эксплуатируются на многих предприятиях стран СНГ и дальнего зарубежья.

The principle of operation, the structure, the purpose and technical characteristics of instruments implementing the pulsed method of magnetic structurescopy with monopolar magnetization are given. The characteristics of instruments such as IMA, created over the years in the laboratory of magnetic methods of control of the Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences, are discussed. Created instruments allow to provide the required level of product quality, are an element of the resource saving, successfully operate in many enterprises of the CIS and far abroad

Введение

Надежность и долговечность машин и механизмов в значительной степени определяется механическими свойствами и структурой используемых материалов. Оперативный контроль этих свойств без повреждения изделий при достаточной производительности может быть осуществлен только неразрушающими методами [1]. В черной металлургии и машиностроении наибольшее распространение получили магнитные методы контроля благодаря простоте операций, высокой производительности и чувствительности к контролируемому параметру. В их основе лежит наличие корреляционных связей между магнитными свойствами и структурными параметрами или прочностными характеристиками материала изделий [2].

Физические основы магнитных методов контроля заложены работами В.К. Аркадьева [3, 4], Н.С. Акулова [5–6], Р.И. Януса [7], Ф. Фёрстера [8–10]. Широкое практическое применение эти методы получили благодаря работам М.Н. Михеева [11]. М.А. Мельгуя [12], Э.С. Горкунова [11, 13], Г.В. Биды [13] и др.

Суть магнитных методов неразрушающего контроля структурного состояния состоит в воздействии на изделие магнитным полем, получении информации о магнитном параметре (или о нескольких параметрах), характеризующем структурное состояние изделия, и обработке информации с принятием соответствующего решения.

К настоящему времени установлены связи между магнитными характеристиками и структурой или механическими свойствами для широкого ряда сталей и сплавов. В значительной мере этот материал обобщен в [11–15].

Исходя из информативного параметра, по которому оценивается структурное состояние материала изделия, методы магнитной структуроскопии подразделяются на коэрцитиметрические, по остаточной намагниченности, по магнитной проницаемости, метод магнитных шумов, ферритометрию, метод высших гармоник и многопараметровые. Среди этих методов наибольшее практическое применение получили контроль по коэрцитивной силе [11] и по остаточной намагниченности после локального импульсного намагничивания [12].

В данной работе рассмотрены особенности построения и возможности применения приборов импульсного магнитного контроля (приборов типа ИМА), созданных на протяжении ряда лет в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики НАН Беларуси.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО МЕТОДА

Импульсный магнитный метод неразрушающего контроля структурного состояния ферромагнитных изделий основан на измерении остаточной намагниченности и по физической сущности относится к методу точечного полюса, разработанному Ф. Фёрстером [16].

Принцип контроля по остаточной намагниченности заключается в намагничивании изделия и последующем измерении индукции или напряженности поля остаточной намагниченности, причем в большинстве случаев намагничивание осуществляется в разомкнутой магнитной цепи. Петля гистерезиса ферромагнитного изделия конечных размеров в разомкнутой магнитной цепи из-за размагничивающего действия его концов существенно отличается от петли гистерезиса материала, из которого изделие изготовлено (рисунок 1), причем, чем меньше отношение λ длины изделия к его поперечному размеру, тем сильнее наклоняется петля гистерезиса к оси абсцисс. Поэтому в процессе контроля ферромагнитных изделий с малым соотношением длины к поперечному размеру в разомкнутой магнитной цепи измеряется величина не остаточной магнитной индукции B_r материала, из которого изделие, а остаточной магнитной индукции B_r' тела, или кажущаяся магнитная индукция [3, 16].



Рис. 1. Петля гистерезиса материала и изделия

$$\mu_s = \frac{B'_r}{H_c}.$$
 (1)

В магнитной структуроскопии часто вместо магнитной проницаемости μ_s применяют величину *m*, которую называют проницаемостью формы. Тогда с учетом (1) следует, что кажущаяся магнитная индукция пропорциональна коэрцитивной силе

$$B'_{r} = \frac{1}{\mu_{0}} m H_{c}$$
, (2)

где µ₀ – магнитная постоянная.

Из рисунка 1 видно, что относительные размеры изделия не влияют на его коэрцитивную силу H_c и магнитную индукцию B_s насыщения, но сильно изменяют магнитную проницаемость, которую называют кажущейся магнитной проницаемостью μ_s . Для $1 \le \lambda \le 10$ кажущаяся магнитная проницаемость μ_s практически не зависит от магнитной проницаемости μ материала изделия и определяется только формой и размерами изделия [17]. Кажущаяся магнитная проницаемость μ_s для изделия заданной формы и размеров является величиной постоянной в довольно протяженной области и определяет в этой области наклон петли гистерезиса изделия.

Поэтому контроль по остаточной намагниченности в разомкнутой магнитной цепи по взаимосвязям со структурными характеристиками материала изделия весьма близок к методу коэрцитиметрии [13].

Основным отличием метода точечного полюса от других методов контроля по остаточной намагниченности является намагничивание локальной области изделия, что позволяет контролировать крупногабаритные изделия, которые нельзя намагнитить в проходной катушке. Так как коэффициент *N* размагничивания локально намагниченного участка крупногабаритного изделия или листа достаточно велик, то для локально намагниченного участка также справедлива линейная взаимосвязь между полем остаточной намагниченности и коэрцитивной силой [13].

Осуществляя локальное намагничивание изделия, часто говорят о намагничивании перпендикулярно его поверхности. Однако в этом случае имеется в виду не то, как намагничивается изделие, а как расположена ось намагничивающего элемента относительно поверхности изделия. В действительности локальное намагничивание осуществляется в основном тангенциальной составляющей поля намагничивающего элемента.

Численное моделирование с использованием метода пространственных интегральных уравнений магнитного состояния ферромагнитного диска, находящегося в магнитном поле накладного соленоида [19], показало, что силовые линии внутри диска идут почти парал-



Рис. 2. Зависимость локального коэффициента размагничивания от коэрцитивной силы материала [20]

лельно его поверхности. По оценке [20] локальный коэффициент N_0 размагничивания в процессе намагничивания массивного изделия стержневым электромагнитом составляет 0,3 для магнитомягких материалов и увеличивается по мере роста их коэрцитивной силы и уменьшения магнитной индукции B_{z0} на поверхности изделия под полюсом электромагнита (рисунок 2).

Особенно это характерно для тонколистового проката, так как коэффициент размагничивания в направлении нормали к его поверхности близок к единице. В [21] экспериментально показано, что в случае полной компенсации тангенциальной составляющей намагничивающего поля посредством расположения двух соленоидов на одной оси симметрично с двух сторон ферромагнитного листа и их согласного включения лист не намагничивается. В случае же встречного включения соленоидов, когда в зоне расположения листа нормальные составляющие полей соленоидов компенсируются, а тангенциальные суммируются, намагниченность листа максимальна. Таким образом, локальное намагничивание изделия приводит к его неоднородной намагниченности, направленной в основном параллельно поверхности.

Приборы, основанные на методе точечного полюса, различаются по типу используемого источника намагничивающего поля и по измеряемой компоненте напряженности поля остаточной намагниченности.

Для локального намагничивания изделия в качестве источника намагничивающего поля (намагничивающего элемента) используют постоянный магнит, электромагнит или соленоид, через который пропускается импульс тока (рисунок 3).

Результаты проверки разными исследователями пропорциональности между полем остаточной намагниченности и коэрцитивной силой материала для разных способов точечного намагничивания представлены на рисунке 4. В [16] показано, что при намагничивании образцов листовой трансформаторной стали, отличающихся по коэрцитивной силе, сильным постоянным магнитом с острием типа карандашного грифеля между тангенциальной составляющей $H_{r\tau}$ напряженности поля остаточной намагниченности и коэрцитивной силой H_c наблюдается практически линейная взаимосвязь. Небольшой разброс показаний авторы связывают с неоднородным распределением коэрцитивной силы по листу (рисунок 4, а).

В [20] аналогичные исследования проведены с использованием электромагнита со стержневым сердечником для нормальной составляющей H_{rn0} напряженности поля остаточной намагниченности в центре намагниченного участка. Показано, что взаимосвязь между величинами H_{rn0} и H_c нелинейная, причем отклонение от линейности тем выше, чем выше H_c и ниже B_{z0} . Для магнитомягких материалов ($H_c \le 1000$ A/м) при высоких значениях магнитной индукции B_{z0} (1,8–2,0 Тл) под центром сердечника на поверхности металла $H_{rn0} \approx 2H_c$. Для материалов с $H_c > 1000$ A/м $H_{rn0} < 2H_c$ (рисунок 4, б).



а – стержневой постоянный магнит, б – электромагнит со стержневым сердечником, в – соленоид с импульсным полем, г – Ш-образный магнит; д - П-образный магнит

Рис. 3. Способы получения точечного намагничивания, силовые линии напряженности поля остаточной намагниченности и места расположения магниточувствительных преобразователей.



намагничивание: *а* – *стержневым* постоянным магнитом (толщина металла, мм: \circ – 0,35; • – 0,5; Δ – 0,55) [16]; *б* – электромагнитом со стержневым сердечником (B_{z0} , Тл: \circ – 2; • – 1,8; Δ – 1,6; \blacktriangle – 1,2; \Box – 1) [20]; *в* – электромагнитом с Ш-образным сердечником (I, A: \circ – 9,5; • – 5; Δ – 1; \bigstar – 0,5; \blacksquare – 0,4: \diamond – 0,3; \diamond – 0,2; \Box –стержневым постоянным магнитом) [22]; *г* – импульсным соленоидом: a_1 , мм: – 3 (\circ , •), – 5 (Δ); a_2 , мм: – 7 (\circ , •), – 25 (Δ), 2*b* = 30 мм; H_m ·10⁻⁵ А/м: 1,3(\circ , •); 18,6(Δ); образцы размером 200×200×1 мм: \circ – 08кп, •, Δ – 08ю [23]

Рис. 4. Зависимость напряженности поля остаточной намагниченности от коэрцитивной силы материала

Измерение нормальной составляющей H_{rn} напряженности поля остаточной намагниченности вблизи поверхности образца против центра среднего полюса Ш-образного электромагнита после его удаления [22] показало, что линейная связь между H_{rn} и H_c наблюдается
лишь в достаточно больших намагничивающих полях ($B_{z0} \ge 1,2$ Тл, напряженность H намагничивающего поля в катушке электромагнита – не менее 12000 А/м). При более слабых полях скорость изменения H_{rn} в зависимости от H_c уменьшается и наблюдается даже неоднозначная зависимость между ними в области коэрцитивных сил 1600– 2800 А/м, что связано с недостаточным промагничиванием материала и ограничивает применение данного способа намагничивания в магнитной структуроскопии. Неоднозначность между H_{rn} и H_c наблюдалась также и в случае использования стержневого постоянного цилиндрического магнита диаметром 25 мм с $B_{z0} = 0,92$ Тл (рисунок 4, в).

Нормальная составляющая ∇H_{rn} градиента напряженности поля остаточной намагниченности в центре локально намагниченного импульсным магнитным полем участка листа также пропорциональна коэрцитивной силе материала (рисунок 4, г) [23]. Однако коэффициент их пропорциональности различен для разных материалов, что связано с зависимостью величины ∇H_{rn} и от размера намагниченного участка, на который влияют также магнитные и электрические свойства намагничиваемого материала. Увеличение размеров соленоида (a_1 – внутренний радиус, a_2 – внешний радиус, 2b – длина) и амплитуды H_m импульса магнитного поля на торце соленоида сохраняет близкой к линейной взаимосвязь между ∇H_{rn} и H_c .

Таким образом, физической основой метода точечного полюса является пропорциональность остаточного магнитного поля локально намагниченного участка изделия наиболее чувствительной к структурному состоянию материала магнитной характеристике – его коэрцитивной силе.

ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Решающее значение в процессе выбора преобразователя для измерения поля остаточной намагниченности локально намагниченного изделия имеет характер и диапазон изменения этого поля, возможность компенсации внешних мешающих полей (например, поля Земли) и размеры зоны контроля.

Поле остаточной намагниченности локально намагниченного изделия по своей природе является постоянным, изменяется по величине в широких пределах в зависимости от свойств материала и размеров изделия и от параметров намагничивающего элемента, является достаточно локальным и неоднородным. Измерения низких значе-

ний напряженности остаточного магнитного поля требуют градиентометрических схем построения измерительного преобразователя, что снижает влияние на результаты измерения внешних магнитных полей.

Таким требованиям удовлетворяют феррозондовые преобразователи, которые часто называют зондами Ферстера по имени их создателя или просто феррозондами [18]. С помощью феррозондов можно измерять постоянные магнитные поля в диапазоне от 10⁻³ до 10⁵ А/м [17], что перекрывает диапазон возможных значений поля остаточной намагниченности локально намагниченного изделия.

Принцип действия феррозонда основан на нелинейности перемагничивания входящих в него сердечников. В магнитной структуроскопии чаще всего используются феррозонды с продольным возбуждением. Такой феррозонд состоит из двух ферромагнитных сердечников S_1 и S_2 с высокой магнитной проницаемостью (пермаллой 79НХС или 80НХС), на которые намотаны первичная (возбуждающая) и вторичная (измерительная) обмотки (рисунок 5). Первичные обмотки феррозонда подключаются к генератору переменного тока, который создает в каждом из сердечников переменное магнитное поле напряженностью $H_{\sim} = H_m \sin \omega t$, направленное параллельно оси сердечника. В зависимости от соединения первичных и вторичных обмоток феррозонд может измерять величину магнитного поля (феррозондполемер) или его градиент (феррозонд-градиентометр).

В феррозонде-полемере первичные обмотки соединяются между собой последовательно-встречно, а вторичные – последовательносогласно (рисунок 5, а). В отсутствии внешнего магнитного поля и при одинаковых свойствах сердечников магнитная индукция в каждом из них (B_1 и B_2 соответственно) изменяется одинаково, но в противоположной полярности, так что суммарный выходной сигнал с измерительных обмоток равен нулю (на рисунке 5 для наглядности изображены безгистерезисные петли).

Если на феррозонд-полемер воздействует внешнее магнитное поле напряженностью $H_{=}$, то напряженность магнитного поля и соответствующая ей магнитная индукция в одном из сердечников увеличивается $(H_1 = H_m \sin \omega t + H_{=})$, а в другом уменьшается $(H_1 = H_m \sin \omega t - H_{=})$. В этом случае магнитная индукция B_1 будет равняться нулю (точка *a*) при $H_1 = H_m \sin \omega t = -H_{=}$, то есть кривая B_1 сдвигается влево параллельно оси H на величину $H_{=}$ (штриховая линия). Одновременно кривая B_2 сдвигается вправо (штриховая линия) па-

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_

раллельно оси H на величину $H_{=}$ (точка b). Поэтому суммарное значение магнитной индукции $B_1 + B_2$ в сердечниках отлично от нуля (рисунок 5, а) и пропорционально внешнему магнитному полю $H_{=}$.



Вследствие нелинейности кривой намагничивания сердечников суммарный выходной сигнал с измерительных обмоток феррозонда представляет собой набор четных гармоник, основной из которых является вторая гармоника. Амплитуда этой гармоники пропорциональна H_{\perp} и является информативным параметром для измерения постоянного магнитного поля.

В феррозонде-градиентометре первичные обмотки соединяются между собой последовательно-согласно, а вторичные – последовательно-встречно (рисунок 5, б). В однородном внешнем магнитном поле и при одинаковых свойствах сердечников магнитная индукция (B_1 и B_2) в каждом из них изменяется одинаково в любой момент времени. Так как вторичные обмотки включены встречно, то суммарный сигнал, снимаемый с них, равен нулю независимо от величины внешнего магнитного поля.

Если же внешнее магнитное поле неоднородно, то магнитное поле и величины магнитной индукции в каждом из сердечников будут отличаться, а суммарный сигнал измерительных обмоток (амплитуда второй гармоники) будет пропорциональна разности измеряемых полей.

Так как информативным параметром в приборах с использованием феррозондов является амплитуда второй гармоники, то типовая схема для реализации измерений помимо феррозонда содержит генератор переменного напряжения, удвоитель частоты, фильтр второй гармоники, селективный детектор и индикатор.

ТОПОГРАФИЯ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ

Исследования распределения поля остаточной намагниченности внутри локально намагниченного участка ферромагнитного изделия и над его поверхностью необходимо как для анализа процессов локального намагничивания, так и для выбора той или иной схемы локального намагничивания и расположения магниточувствительных элементов преобразователя.

Процесс намагничивания ферромагнитного материала описывается системой уравнений Максвелла в совокупности с граничными условиями и материальными уравнениями. Однако нелинейное изменение основных магнитных характеристик ферромагнитного материала с изменением внешнего магнитного поля и явление магнитного гистерезиса исключает получение аналитического решения данной задачи даже для однородных магнитных полей. Поэтому анализ процессов локального намагничивания проводится либо на основе экспериментально полученного распределения поля остаточной намагниченности, либо с использованием приближенных моделей (в большинстве на основе метода фиктивных магнитных зарядов), либо с использованием численных методов моделирования. Схема силовых линий и распределение нормальной H_{rn} и тангенциальной $H_{r\tau}$ составляющих напряженности H_r поля остаточной намагниченности при локальном намагничивании стального листа для глубокой вытяжки с коэрцитивной силой $H_c = 280$ А/м представлены на рисунке 6 [16]. Намагничивание осуществлялось сильным постоянным магнитом с острием типа карандашного грифеля, который устанавливался перпендикулярно поверхности листа, а затем удалялся. Составляющие H_{rn} и $H_{r\tau}$ напряженности поля остаточной намагниченности измерялись вдоль поверхности листа на разной высоте от нее (0, 1, 3, 5 мм) микрозондами Ферстера (длина 2–3 мм) [18].

Прямо над полюсом у поверхности образца нормальная состав-



ляющая *H*_{rn} имеет максимум и плавно уменьшается по мере удаления точки измерений по обе стороны от центра намагниченного участка, сохраняя СВОЮ полярность. Тангенциальная составляющая $H_{r\tau}$ у поверхности образца прямо под полюсом равна нулю, меняет при переходе через эту точку свой знак из-за изменения направления силовых линий и имеет два максимума разной полярности на некотором расстоянии ОТ намагниченного участка.

С увеличением расстояния от поверхности образца, на котором производились измерения обеих составляющих напряженности поля остаточной намагниченности, общий ход закономерностей их изменения вдоль поверхности образца сохраняется, уменьшаются лишь пропорционально увеличению расстояния от поверхности их абсолютные значения и смещаются в сторону увеличения положения максимумов тангенциальной составляющей.

Распределение нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при намагничивании электромагнитом со стержневым цилиндрическим сердечником [20, 24] зависит от магнитных свойств его материала и степени намагниченности изделий, определяемой величиной B_{z0}, диаметром сердечника и величиной зазора между сердечником и изделием. Оно несколько отличается от аналогичного распределения в случае намагничивания изделия стержневым постоянным магнитом. Во-первых, максимум H_{rn} совпадает с центром намагниченного участка только при относительно больших значениях индукции B_{z0} (B_{z0} = 0,4 Тл для изделия с H_c = 700 А/м и B_{z0} = 1,1 Тл для изделия с H_c = 2550 А/м). Во-вторых, кривые *Н*_{*rn*} помимо максимума в центральной части намагниченного участка имеют два небольших максимума противоположной полярности симметрично с двух сторон от центра. Показано также, что с увеличением площади полюса электромагнита и уменьшением коэрцитивной силы материала изделия наблюдается более плавный спад значений H_{rn} по мере удаления точки измерений от центра намагниченного участка. К сожалению, воспользоваться предложенными в этих работах полуэмпирическими формулами для оценки распределения H_{rn} затруднительно из-за неопределенности входящего в них "местного размагничивающего фактора".

В [25] этими же авторами установлено, что при намагничивании изделия электромагнитом со стержневым цилиндрическим сердечником отношение текущего значения $H_{r\tau}$ к ее максимальному значению при изменении точки измерения в пределах от центра намагниченного участка до положения этого максимума не зависит от магнитных свойств и толщины изделия. На больших расстояниях от центра намагниченного участка данная закономерность нарушается, причем для более мягких материалов этот спад идет плавней.

Толщина и свойства материала оказывают существенное влияние на распределение нормальной H_{rn} и тангенциальной $H_{r\tau}$ составляющих напряженности поля остаточной намагниченности от электромагнита со стержневым сердечником. Измерения H_{rn} и $H_{r\tau}$, проведенные в [26] при постоянном значении магнитной индукции B_n в полюсе электромагнита, показали (ввиду симметрии относительно

центра на рисунке 6 показана только правая часть распределений H_{rn} и H_{rn}), что с уменьшением толщины образцов величина H_{rn} и протяженность намагниченного участка увеличиваются. Уменьшение H_c снижает влияние толщины образцов на величину H_{rn} . В то же время тангенциальная составляющая $H_{r\tau}$ слабо зависит от толщины образцов и определяется в основном величиной H_c .



сталь 30ХГСА, толщина: 16,5 мм (а, б); 5,5 мм (в, г); *H_c*, А/м: ○, Δ – 3200; ●, ▲ – 840



В [27] показано, что основной вклад в поле от остаточной намагниченности массивного ферромагнитного изделия, намагниченного приставным электромагнитом, вносят сравнительно небольшие объемы изделия, располагающиеся при намагничивании непосредственно под полюсами электромагнита.

Существенное влияние на результаты локального намагничивания изделия электромагнитом со стержневым цилиндрическим сердечником оказывает величина зазора между сердечником и изделием. В [28] установлено, что магнитная индукция на поверхности изделия под полюсом при небольших изменениях зазора (до 0,3 мм) изменяется примерно на 10 % на 0,1 мм изменения зазора. Среднее изменение B_{z0} с изменением зазора в более широкой области составляет 5–6 % на 0,1 мм изменения зазора. Скашивание сердечника усиливает влияние зазора на величину магнитной индукции на поверхности изделия под полюсом, а уменьшение его длины ослабляет это влияние. Влияние зазора между сердечником и поверхность изделия на величину B_{z0} является основным недостатком локального намагничивания постоянными магнитами или электромагнитами с ферромагнитными сердечниками.

Распределение поля остаточной намагниченности изделия после локального импульсного намагничивания качественно совпадает с аналогичными распределениями при использовании стержневого постоянного магнита и электромагнита со стержневым ферромагнитным сердечником. В [29] показано, что при намагничивании изделий с большим размагничивающим фактором (сталь 08ю размером 200×200×1 мм) малогабаритным накладным соленоидом, через который пропускается импульс тока, максимумы нормальной и тангенциальной составляющих и их градиенты определяются свойствами намагничиваемого материала, амплитудой и длительностью намагничивающих импульсов и размерами соленоида (рисунок 8). В исследуемом диапазоне параметров импульсного магнитного поля (длительность импульса от 0,06 до 25 мс и амплитуда импульсов от 4·10⁴ до 8·10⁵ А/м) авторы установили, что основным параметром импульсного магнитного поля, определяющим размер намагниченного участка, является амплитуда импульсов. Длительность и количество импульсов, а также свойства материала на размер намагниченного участка не оказывают существенного влияния. В то же время они во многом определяют величину максимумов (центрального и локальных) составляющих напряженности поля остаточной намагниченности.

В [30] показано, что с увеличением расстояния от поверхности намагничиваемого листа величины максимумов нормальной и тангенциальной составляющих уменьшаются примерно по экспоненциальному закону, а расстояние, на котором нормальная составляющая меняет знак, и расстояние, на котором тангенциальная составляющая достигает максимума, увеличиваются практически линейно.



сталь 08ю; размер 200×200×1 мм; температура отжига, °C: – без отжига, ● – 400, Δ – 530, ▲ – 800

Рис. 8. Распределение нормальной (а) и тангенциальной (б) составляющих напряженности поля остаточной намагниченности при импульсном намагничивании [29]

Увеличение до 25 мм внешнего радиуса намагничивающего соленоида и до 10⁶ А/м амплитуды создаваемого им импульсного магнитного поля при вариации длительности импульса от 1 до 10 мс позволило выявить влияние переднего и заднего фронтов импульса на результаты локально намагничивания изделий разной толщины (сталь 45, диаметр 195 мм, толщина 1–30 мм) [31, 32].

В последнее время широкое распространение получили численные методы моделирования процессов намагничивания [19, 33]. В [19] на основе метода пространственных интегральных уравнений выполнен расчет составляющих векторов намагниченности и магнитной индукции в образце и магнитной индукции на его поверхности и проведена его экспериментальная проверка. Полученные закономерности совпали с общими физическими представлениями о процессе локального намагничивания ферромагнитных изделий.

ПРИБОРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Наиболее известной реализаций контроля структурного состояния изделий с использованием локального однополярного намагничивания является прибор, разработанный Ф. Фёрстером [16]. На рисунке 9 представлен преобразователь этого прибора. Контролируемое изделие локально намагничивают путем соприкосновения с изделием и последующего удаления от него подпружиненного постоянного магнита стержневой формы. Остаточную магнитную индукцию локально намагниченного участка определяют по тангенциальной составляющей напряженности полей рассеяния после удаления магнита феррозондом, сердечники которого расположены симметрично с двух сторон оси, вдоль которой перемещается магнит. Включение феррозонда по схеме градиентометра позволило ослабить влияние внешних магнитных полей и магнитного поля используемого магнита. Измерение тангенциальной составляющей напряженности остаточного поля в процессе вращения феррозонда вокруг оси преобразователя позволило помимо контроля механических свойств листовых материалов оценивать и анизотропию магнитных свойств электротехнических сталей. Если ось феррозонда располагать параллельно краю листа, то измерения можно вести на расстоянии 8 мм от края, а если перпендикулярно – то до 40 мм.

Данный метод применялся также для контроля массивных деталей на однородность структуры, для сортировки чувствительных к старению тонколистовых сталей, для контроля степени отжига литых деталей, при сортировке по маркам углеродистых сталей и при определении глубины цементированного слоя [17].

Основным ограничением данного прибора и его аналогов является состояние поверхности контролируемого изделия, так как даже небольшой зазор (доли миллиметра) значительно ослабляют магнитную индукцию постоянного магнита на поверхности металла.

При реализации метода точечного полюса с применением локального намагничивания изделия стержневым постоянным магнитом в [34] в качестве информативного параметра вместо градиента тангенциальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности измеряли градиент нормальной составляющей (сортировщик магнитный MC-1). Для этого после удаления магнита от поверхности использовалась специальная система на основе поворотного рычага, которая устанавливала феррозонд в точку контроля (рисунок 9, б). Однако такая система менее надежна, чем прибор Ф. Фёр-

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_

стера, так как предъявляет дополнительные требования к точности установки феррозонда. Прибору MC-1 присущи и другие недостатки намагничивания с использованием постоянного магнита (недостаточная величина намагничивающего поля, высокая чувствительность к качеству поверхности контролируемого изделия или к зазору между ним и преобразователем, а также сильное влияние магнитной предыстории изделия), что ограничивает его применение.



а – Ф. Фёрстера [16]: 1 – изделие, 2 – неподвижное основание, 3 – постоянный магнит; 4 – вращающийся держатель феррозонда, 5 – шкала угла поворота, 6 – феррозонд-градиентометр; **б** – сортировщика магнитного MC-1[34]: 1 –изделие, 2 – корпус, 3 – постоянный магнит, 4 – концентратор, 5 – пружина, 6 – рычаг, 7 –феррозонд-градиентометр; **в – прибора ИКС-50 [36]:**1 – изделие, 2 – обмотка электромагнита, 3 – ферромагнитный сердечник, 4 – стальное кольцо, 5 – стальной экран, 6 – обмотка возбуждения феррозонда, 7 – измерительная обмотка феррозонда

Рис. 9. Преобразователи с ферромагнитным сердечником

Для повышения величины намагничивающего поля использовались различные конструкции электромагнитов с сердечниками.

Так, для контроля твердости термически обработанных изделий в [35] локальное намагничивание осуществлялось катушкой с выдвижным сердечником. В процессе разряда конденсатора импульс тока, проходя через катушку, выдвигает сердечник до соприкосновения с поверхностью изделия и намагничивает его локальную область. Измерение остаточной магнитной индукции осуществлялось пассивной индукционной головкой, перемещаемой электродвигателем.

В [36] сердечник электромагнита для локального намагничивания одновременно являлся и сердечником феррозонда (рисунок 9, в). Такая конструкция позволила исключить из намагничивающей цепи преобразователя феррозонд и, следовательно, устранить необходимость удаления сердечника из зоны контроля после намагничивания изделия. Особенностью разработанного с использованием такого преобразователя прибора ИКС-50 являлось то, что намагничивание изделия осуществлялось переменным током частотой 50 Гц в нечетные (четные) периоды, а измерение поля остаточной намагниченности в четные (нечетные) периоды.

Для контроля по методу точечного полюса применялся и электромагнит с П-образным сердечником, который одновременно являлся и сердечником магнитомодуляционного преобразователя [37].

Однако приборы, основанные на измерении остаточной намагниченности после локального намагничивания стержневым постоянным магнитом или электромагнитом с ферромагнитным сердечником, не получили широкого практического применения в первую очередь из-за большой чувствительности результатов к величине зазора между поверхностью изделия и преобразователем.

Более перспективным оказалось применение для локального намагничивания изделий соленоида без ферромагнитного сердечника, через который пропускается импульс тока.

В общей формулировке импульсный магнитный метод контроля структурного состояния ферромагнитного изделия заключается в его локальном намагничивании неоднородным импульсным магнитным полем накладного соленоида без сердечника, ось которого перпендикулярна поверхности изделия, и измерении вдоль этой оси градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности (рисунок 10) [12]. По величине этого градиента и по заранее установленным корреляционным связям определяют механические свойства и структуру материала (твердость, предел прочности, балл зерна и т.п.) в соответствии с ГОСТ 30415-96.

Использование соленоида без ферромагнитного сердечника позволило существенно упростить и повысить надежность преобразователя за счет размещения феррозонда внутри этого соленоида вдоль его оси [38], а импульсный режим обеспечил возможность



Рис. 10. Принцип работы приборов импульсного магнитного контроля

варьировать широких В пределах процесс намагничивания. В [39] соленоид выполнен в виде плоской спирали, над которой устаферрозонд. навливается Однако в разработанном автором приборе "Полюс-1" использовался преобразователь типа [38] (вероятно что спираль потому, не обеспечивала в зоне контроля требуемой величины намагничивающего поля).

Проведенные В [40, 41] исследования показали, что для обеспечения требуемой погрешности контроля энергия импульса должна составлять не менее 3-5 Дж, причем достоверность можно повысить

многократным повторением импульсов. Там же установлен минимальный диаметр соленоида (8–10 мм), обеспечивающий рассеяние такой энергии, и показано, что размеры намагниченного участка в 3–4 раза превышают диаметр соленоида, а при толщине изделия более 8–10 мм его размеры и форма не влияют на результаты контроля. Качественно данные результаты совпадают с закономерностями, установленными Ф. Фёрстером для постоянного стержневого магнита. Пропорциональность показаний прибора "Полюс–1" коэрцитивной силе материала при амплитуде импульса 10⁶ А/м и его длительности 1 мс наблюдается до величин 10⁴ А/м [40]. Однако широкого применения прибор "Полюс–1" не получил. На основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории магнитных методов контроля Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси [12, 19, 23, 29, 42–47], разработана широкая гамма импульсных магнитных анализаторов типа ИМА разных модификаций [48–54].

Локальное намагничивание контролируемого изделия в этих приборах осуществляется посредством разряда батареи конденсаторов на малогабаритный соленоид, устанавливаемый своим торцом на объект контроля. Измерение градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности осуществляется с помощью феррозонда-градиентометра, расположенного внутри намагничивающего соленоида на его оси в области однородного поля (рисунок 11).



а : 1 – контролируемое изделие, 2 – намагничивающий соленоид, 3 – феррозонд-градиентометр, *a*₁ – внутренний диаметр, *a*₂ – внешний диаметр, 2*b* – длина соленоида; *б* : распределение поля остаточной намагниченности после локального намагничивания

Рис. 11. Принцип устройства преобразователя прибора ИМА

Отсутствие ферромагнитного сердечника в намагничивающей цепи позволило существенно снизить влияние непостоянства зазора между преобразователем и контролируемым изделием на результаты намагничивания, а применение феррозонда-градиентометра – ослабить влияние внешних магнитных полей на точность измерения информативного параметра [43, 44, 46].

В процессе намагничивания изделия накладным соленоидом ввиду большого размагничивающего фактора основной вклад в

намагниченность локального участка изделия вносит тангенциальная составляющая намагничивающего поля. Особенно это характерно для изделий малой толщины. По мере ее увеличения влияние нормальной составляющей намагничивающего поля возрастает.

В процессе импульсного намагничивания в материале изделия возникают вихревые токи, размагничивающее действие которых приводит к ряду аномальных эффектов, таких как неоднозначная зависимость градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности от амплитуды намагничивающих импульсов или гистерезис этого градиента при циклическом импульсном перемагничивании [46, 47].

В зависимости от назначения приборы, реализующие импульсный магнитный метод, отличаются параметрами формируемого магнитного поля (конфигурацией поля, амплитудой, длительностью и числом импульсов), а также диапазоном и временем измерения градиента напряженности поля остаточной намагниченности, что достигается разными схемными решениями.

Внешний вид преобразователей приборов типа ИМА с однополярным намагничиванием разных модификаций представлен на рисунке 12, их структурные схемы – на рисунках 13 – 16, а внешний вид – на рисунке 17.

Для неразрушающего контроля качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 4 мм после технологического отжига были разработаны импульсные магнитные анализаторы типа ИМТ-1 (прибор, который начал серию импульсных магнитных анализаторов), ИМА-2, ИМА-2А, ИМА-3, ИМА-4, ИМА-4А и ИМА-4М [48–51].

Намагничивающий соленоид приборов данного типа имеет внутренний диаметр 6 мм (для ИМА-4А и ИМА-4М – 8 мм), внешний диаметр 14 мм (для ИМА-4А и ИМА-4М –18 мм) и длину 30 мм. Амплитуда импульса на торце соленоида может варьироваться от $1,3\cdot10^4$ до $1,3\cdot10^5$ А/м (ИМА-2, ИМА-2А, ИМА-3) и от $0,7\cdot10^5$ до $2,1\cdot10^5$ А/м (ИМА-4). В приборах ИМА-4А и ИМА-4М амплитуда импульсов не регулируется и составляет 2,1 А/м. Длительность импульсов приборов данного класса составляет примерно 1 мс (по уровню 0,05), а их число может устанавливаться в пределах 1–5 (ИМА-2), 1–10 (ИМА-2А, ИМА-3, ИМА-4 и ИМА-4А) и фиксировано 10 (ИМА-4М). Режим намагничивания выбирается в зависимости от толщины и свойств контролируемого материала и обеспечивает стабильные результаты намагничивания изделий толщиной до 4 мм.



Рис. 12. Преобразователи приборов ИМА



1 - преобразователь;

2 – блок измерения: 2.1 – генератор фиксированной частоты, 2.2 – буферный каскад, 2.3 – удвоитель частоты, 2.4 – катодный повторитель, 2.5 – усилитель удвоителя, 2.6 – селективный усилитель, 2.7 – дискриминатор, 2.8 – индикатор; 3 – блок питания;

4 – программный генератор импульсов тока: 4.1 – переключающее устройство, 4.2 – мультивибратор (задающий генератор), 4.3 – стабилизатор напряжения низковольтный, 4.4 – ждущий мультивибратор, 4.5 – реле, 4.6 – блок программирования числа импульсов.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-2А

 $\begin{bmatrix} I \\ 1.1 \\ 1.1 \\ 1.2 \\ 1.3 \\ 1.3$

1 – преобразователь: *1.1* – феррозонд-градиентометр, *1.2* – намагничивающий соленоид, *1.3* – кнопка «ПУСК»;

2 - устройство формирования импульсов: 2.1 – узел управления, 2.2 – резистор, 2.3 – счетчик импульсов, 2.4 – ключ заряда, 2.5 – накопительный конденсатор, 2.6 – ключ разряда;

3 – измеритель градиента магнитного поля: *3.1* – задающий генератор, *3.2* – буферный каскад, *3.3* – полосовой фильтр, *3.4* – усилитель, *3.5* – детектор, *3.6* – индикатор;

4 - источник питания

Импульсный магнитный анализатор ИМА-4

Рис. 13. Функциональные схемы приборов ИМА

б



1 – генератор;

2 – блок намагничивания;

3 – преобразователь (3.1 – намагничивающий соленоид, 3.2 – феррозонд – градиентометр, 3.3 – компенсирующие катушки, 3.4 – кнопка "ПУСК");

4 – блок управления; 5 – блок измерения; 6 – блок автоматического переключения диапазонов;
7 – программатор; 8 – амплитудноцифровой преобразователь;
9 – блок индикации; 10 – блок питания.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А

б



1 – преобразователь: 1.1 – намагничивающий соленоид, 1.2 – феррозонд– градиентометр; 2 – блок управления;

3 – блок измерения: 3.1 – разделителььный конденсатор, 3.2 – задающий генератор, 3.3 – селективный усилитель, 3.4 – делитель частоты, 3.5 – синхронный детектор, 3.6 – интегрирующий усилитель мощности, 3.7 – интегратор, 3.8 – аналого-цифровой преобразователь, 3.9 – индикатор;

4 – блок намагничивания: 4.1 – блок заряда, 4.2 – демпфирующий диод, 4.3 – резистор, 4.4 – накопительный конденсатор, 4.5 – блок управления разрядом, 4.6 – тиристор, 4.7 – резистор (датчик тока), 4.8 – счетчик импульсов.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М

Рис. 14. Функциональные схемы приборов ИМА



а

1 – преобразователь: 1.1 – намагничивающий соленоид, 1.2 – феррозондградиентометр;

2 – генератор импульсов тока: 2.1 – программное устройство, 2.2 – генератор тактовых импульсов, 2.3 – зарядно-разрядное устройство;

3 – блок измерения градиента магнитного поля: 3.1 – генератор, 3.2 – усилитель мощности, 3.3 – полосовой фильтр, 3.4 – согласующий каскад, 3.5 – делитель, 3.6 – согласующий каскад, 3.7 – резонансный усилитель, 3.8 – детектор, 3.9 – индикатор;

4 – блок питания

Импульсный магнитный анализатор ИМА-5



градиентометр;

2 – блок намагничивания: 2.1 – блок конденсаторов, 2.2 – зарядно-разрядное устройство, 2.3 – ступенчатый стабилизатор амплитуды, 2.4 – счетчик импульсов;

3 – блок возбуждения феррозонда: 3.1 – задающий генератор, 3.2 – делитель частоты, 3.3 – интегрирующий усилитель мощности;

4 – блок измерения второй гармоники: 4.1 – масштабный усилитель, 4.2 – фазовращатель, 4.3 – синхронный детектор, 4.4 – усилитель, 4.5 – индикатор.

5 - блок питания

Импульсный магнитный анализатор ИМА-5А

Рис. 15. Функциональные схемы приборов ИМА



1 – генератор возбуждения феррозонда; 2 – блок намагничивания; 3 – преобразователь (3.1 – намагничивающий соленоид, 3.2 – феррозонд-градиентометр, 3.3 – компенсирующие катушки); 4 – блок управления; 5 – блок измерения; 6 – блок автоматического переключения пределов измерения; 7 – блок аналого-цифрового преобразования; 8 – блок индикации; 9 – блок поиска оптимальной амплитуды; 10 – программатор амплитуды намагничивания; 11 – программатор величины зазора; 12 – программатор количества импульсов размагничивания; 13 – программатор количества импульсов намагничивания; 14 – блок питания.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б

Рис. 16. Структурные схемы приборов ИМА

Во всех приборах используется феррозонд-градиентометр диаметром 4,5 мм и длиной 28 мм (рисунок 12), питаемый, в зависимости от модификации прибора, переменным напряжением синусоидальной или треугольной формы частотой 5 или 10 кГц. Данный феррозонд без использования компенсационных схем обеспечивает измерения градиента магнитного поля до 3,1·10⁴ А/м.

Прибор ИМА-3 отличается от прибора ИМА-2А только наличием цифрового индикатора (рисунок 17).

Особенностью прибора ИМА-4А является то, что измерение градиента напряженности магнитного поля осуществляется компенсационным методом (рисунок 14, а). Для этого преобразователь прибора содержит дополнительно две расположенные внутри соленоида симметрично относительно его центра и соединенные между собой последовательно-встречно компенсирующие катушки (рисунок 12). В связи с этим внутренний и внешний диаметры намагничивающего соленоида увеличены до 8 и 18 мм соответственно. Введение компенсирующих катушек позволило расширить пределы измерения до 10^5 A/m^2 , улучшить линейность, уменьшить дополнительную температурную погрешность до 0,15 % на 10 °C в интервале 5–50 °C. В настоящее время взамен прибора ИМА-4А выпускается анализатор импульсный магнитный ИМА-4М (рисунок 17) [51]. В отличие от прибора ИМА-4А, компенсационный сигнал в приборе ИМА-4М подается прямо на измерительную обмотку феррозонда. В этой модели прибора введена также регулировка положения феррозонда в преобразователе и регулировка длительности заднего фронта намагничивающих импульсов, что позволило улучшить его технические характеристики.

Принцип работы приборов типа ИМА рассмотрим на примере прибора ИМА-4М, структурная электрическая схема которого представлена на рисунке 14.

Измерение градиента напряженности магнитного поля осуществляется следующим образом. Задающий генератор 3.2 прибора формирует прямоугольные импульсы частотой 4 МГц, которые после деления (делитель 3.4 частоты) и интегрирования усилителем 3.6 мощности преобразуются в сигнал треугольной формы частотой $f = 5 \ \kappa$ Гц, поступающий на обмотку возбуждения феррозондаградиентометра 1.1 преобразователя 1. Амплитуда тока регулируется в пределах от 50 до 100 мА. С делителя 3.4 частоты снимается также сигнал прямоугольной формы удвоенной частоты (10 кГц) для управления синхронным детектором 3.5.

При воздействии магнитного поля на феррозонд на выходе последнего появляется сигнал, вторая гармоника которого (10 кГц) пропорциональна величине градиента воздействующего поля. Эта гармоника выделяется селективным усилителем 3.3 и детектируется синхронным детектором 3.5, управляемым сигналом с делителя 3.4. Продетектированный сигнал поступает на вход интегрирующего усилителя 3.7 мощности, где сравнивается с нулевым уровнем. Сигнал рассогласования является сигналом обратной связи, который подается на измерительную обмотку феррозонда-градиентометра 1.1. При этом градиент магнитного поля, создаваемый измерительной обмоткой феррозонда, направлен противоположно измеряемому градиенту магнитного поля. Таким образом осуществляется отрицательная обратная связь по градиенту магнитного поля. Коэффициент передачи тракта селективный усилитель – синхронный детектор – интегратор достаточно велик для того, чтобы разность между градиентом измеряемого магнитного поля и градиентом, создаваемым сигналом обратной связи, была практически равна нулю. Градиент, создаваемый сигналом обратной связи, определяется величиной выходного напряжения интегратора 3.7, которое поступает на вход аналого-цифрового преобразователя 3.8.

Управление работой аналого-цифрового преобразователя *3.8* и прием цифрового кода, соответствующего аналоговому сигналу измерительно-детекторного блока, осуществляется однокристальной микро-ЭВМ. Регистр памяти обеспечивает фиксацию младшего байта адреса при обращении к внешней памяти (ПЗУ). В ПЗУ хранится программа работы однокристальной микро-ЭВМ.

Результат измерения после обработки однокристальной микро-ЭВМ поступает на индикатор *3.9*, состоящий из семисегментных элементов. Однокристальная микро-ЭВМ обеспечивает также передачу данных в ПЭВМ в коде КОИ-8 по ГОСТ 19768-74 (через последовательный интерфейс RS232).

Для осуществления операции контроля преобразователь прибора устанавливается на контролируемое изделие и нажимается кнопка ПУСК. После чего из блока 2 управления подаются соответствующие сигналы в блок 4 намагничивания и аналого-цифровой преобразователь 3.8 (АЦП). Одновременно запускается блок 4 намагничивания, блокируется аналого-цифровой преобразователь 3.8, на табло индикатора гаснут результаты предыдущего измерения и индицируется буква "Н". Блок 4 намагничивания генерирует импульсы тока (серия из 10 импульсов), которые, проходя через намагничивающий соленоид 1.2, расположенный в преобразователе 1, создают импульсное магнитное поле, намагничивающее контролируемое изделие. По прохождении 10 импульсов намагничивание завершается, и блок 2 управления устанавливается в исходное состояние, что приводит к выключению блока 4 намагничивания и разблокированию АЦП. После этого производится индикация результата измерения.

Диапазон измерения градиента напряженности магнитного поля прибором ИМА-4М – 200÷2·10⁴ А/м²; погрешность измерения градиента – 5 %; погрешность из-за изменения зазора – не более 1,5 % на каждые 0,1 мм; амплитуда намагничивающих импульсов – 2,1·10⁵ А/м; время контрольной операции (намагничивание – измерение) – не более 10 с; диаметр контактной площадки преобразователя – 18 мм; зона влияния краевого эффекта – 100 мм; габаритные размеры – 320×320×100 мм; масса – не более 7 кг.

Для изделий из низкоуглеродистых холоднокатаных отожженных сталей толщиной 0,15–4,0 мм прибор ИМА-4М обеспечивает контроль твердости в пределах от 30 до 100 единиц по шкале $HRB_{30/100}$; предела текучести $\sigma_{\rm T}$ от 200 до 740 МПа; предела прочности $\sigma_{\rm B}$ от 20 до 830 МПа; относительного удлинения δ_{10} от 2 до 50 %, а также контроль глубины лунки по Эриксену, среднего размера зерна феррита, балла зерна феррита и цементита. Прибор может также применяться

для сортировки сталей по маркам и для контроля уровня остаточной намагниченности изделий.

Условия эксплуатации анализатора ИМА-4М: температура окружающей среды от плюс 5 до плюс 40 °С, максимальная влажность воздуха до 75 % при температуре до 30 °С. Питание анализатора ИМА-4М осуществляется от однофазной сети переменного тока напряжением (220 \pm 22) В частотой (50 \pm 1) Гц. Габаритные размеры прибора – 320х320х100 мм³; масса – не более 7 кг.

Метрологическое обеспечение прибора ИМА-4М проводится с помощью меры градиента магнитного поля типа МГП-5Б в соответствии с МП.МН 785-2000 и не требует применения стандартных образцов металла [55].

Анализатор ИМА–4М прошел государственные испытания и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений Республики Беларусь под № РБ 03 14 1018 11, России – под № 19948-00 и имеет сертификаты РБ № 7439 и России № 26238/1.

Контроль изделий толщиной свыше 4 мм требует увеличения размеров намагничивающего соленоида и амплитуды и длительности намагничивающих импульсов. Для контроля таких изделий разработаны приборы типа ИМА-5, ИМА-5А и ИМА-5Б [52–54].

Увеличение амплитуды намагничивающих импульсов ДО 1,3·10⁶ А/м, длительности импульсов до 2 мс (по уровню 0,5), внутреннего и внешнего диаметров соленоида соответственно до 10 и 50 мм, реализованное в приборе ИМА-5 [52], позволило повысить стабильность контроля, особенно при контроле толстых изделий, и тем самым расширить до 30 мм диапазон толщин изделий, на которых возможен контроль. Так, при намагничивании изделий толщиной более 4 мм с помощью преобразователя прибора ИМА-4 (создающего импульс магнитного поля 2,1·10⁵ А/м) программы даже из 10 импульсов недостаточно для получения стабильных результатов. При амплитуде 1,3·10⁶ А/м для стабильного намагничивания образцов толщиной 4,5 мм достаточно трех импульсов, при толщине 10-16 мм шести импульсов и лишь при толщине изделия порядка 29-30 мм требуется программа из 10 импульсов.

Кроме того, по сравнению с приборами типа ИМА-2 – ИМА-4М режим намагничивания прибором ИМА-5 позволяет снизить от 2 (на тонких изделиях) до 20 (на толстых изделиях) раз влияние магнитной предыстории на результаты контроля.

Отличительной особенностью прибора ИМА-5А [53] является то, что в нем предусмотрена возможность выбора амплитуды намагничивающих импульсов в диапазоне от 1,3·10⁵ до 1,3·10⁶ А/м, при которых на изделиях толщиной свыше 5 мм наблюдается неоднозначность зависимости градиента напряженности поля остаточной намагниченности от амплитуды этих импульсов [45]. Это позволило снизить в этом приборе погрешность из-за непостоянства зазора между преобразователем и объектом контроля для изделий толщиной свыше 5 мм. При этом на толстых изделиях величина погрешности измерений из-за изменений зазора в пределах от 0 до 2 мм не превышает 5 %.

Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б [54] обладает, по сравнению с другими приборами типа ИМА, рядом дополнительных функциональных особенностей.

Во-первых, в приборе ИМА-5Б значительно снижено влияние на результаты контроля магнитной предыстории изделия за счет возможности автоматического размагничивания, которое осуществляется одной или несколькими сериями свободно затухающих колебаний тока разряда батареи накопительных конденсаторов через намагничивающий соленоид, что позволяет применять его при контроле изделий со случайно наведенной намагниченностью.

Во-вторых, в приборе ИМА-5Б реализован метод автоматического выбора оптимальной амплитуды намагничивающих импульсов, при которой достигается эффект отстройки от влияния непостоянства зазора между преобразователем и изделием на результаты контроля, основанный на неоднозначной зависимости измеряемого градиента от амплитуды намагничивающих импульсов. Выбор амплитуды осуществляется посредством имитации реального влияния изменения зазора (или толщины покрытия) последовательным изменением режима намагничивания и режима измерения.

Прибор ИМА-5Б обладает улучшенными метрологическими характеристиками: более чем в пять раз увеличен верхний предел измерения градиента напряженности магнитного поля ($2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$), на изделиях толщиной свыше 5 мм снижена до 5% погрешность из-за непостоянства в пределах 0–2 мм зазора между преобразователем и контролируемым изделием и тем самым обеспечен контроль изделий с защитными лакокрасочными и полимерными покрытиями при непостоянстве толщины этих покрытий, значительно улучшена временная и температурная стабильность измерений за счет применения компенсационного метода измерения. Кроме того, прибор имеет автоматическое переключение поддиапазонов измерения. Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением $220B_{-15\%}^{+10\%}$ частотой 50 Гц; потребляемая мощность – не более 300 Вт; габаритные размеры – 510×230 мм; масса – не более 22 кг.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_



Рис. 21. Общий вид приборов ИМА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные на основе измерения градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности после локального импульсного однополярного намагничивания, приборы позволяют решить широкий круг задач магнитной структуроскопии: контроль качества термообработки, механических свойств и структуры изделий из низкоуглеродистых и слаболегированных сталей толщиной от 0,15 до 30 мм после технологического отжига. Приборы могут также применяться для сортировки сталей по маркам и для контроля уровня остаточной намагниченности изделий.

Литература

- 1. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов: ГОСТ 18353-79. Введ. 01.07.80. М: Издательство стандартов, 1979. 12 с.
- 2. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева Т. 6: В 3 кн. Кн. 1: Магнитные методы контроля. / В.В. Клюев, В.Ф. Мужицкий, Э.С. Горкунов, В.Е. Щербинин. М.: Машиностроение, 2004. с. 135-345.
- 3. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах: В 2 ч. Ч. 1: Постоянное электрическое и магнитное поле. М.-Л.: Энергоиздат, 1934.– 230 с.
- 4. Аркадьев В.К. Электромагнитные процессы в металлах: В 2 ч. Ч. 2: Электромагнитное поле. Применение теории Максвелла к рациональному использованию металлов в электротехнике. – М.-Л.: Энергоиздат, 1936. – 304 с.
- 5. Акулов Н.С. Методы магнитного анализа. Заводская лаборатория. 1934. Т. 3, № 8, с. 715–718.
- 6. Акулов Н.С. Магнитный анализ металлов. Вестник металлопромышленности. 1940, № 4–5, с. 123–129.
- 7. Янус Р.И. Магнитная дефектоскопия. М.-Л.: ОГИЗ, 1946. 171 с.
- Förster F. Theoretische und experimentelle Grundlagen der elektromagnetischen Qualitätssortierung von Stahlteilen. 4. Das Restfeldverfahren. – Zeitschrift für Metallkunde, 1954. – Bd. 45, H. 4, s. 233–238.
- 9. Förster F. Ein Verfahren zur Messung von magnetischen Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen und seine Anwendung in der Metallforschung und Technik. – Zeitschrift für Metallkunde. – 1955. – Bd. 46, H. 4, s. 358–370.
- Förster F., Stumm W. Messung physikalischer und technologischer Materialeigenschften mit Hilfe magnetischer und elektromagnetischer Messmethoden. – Industrie-Anzeigen, 1974. – Bd. 96, H. 31, s. 685–690.
- 11. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. М.: Наука, 1993. 252 с.
- 12. Мельгуй М.А. Магнитный контроль механических свойств сталей. Минск: Наука и техника, 1980. 184 с.
- 13. Бида Г.В., Горкунов Э.С., Шевнин В.М. Магнитный контроль механических свойств проката. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 253 с.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_

- 14. Бида Г.В., Ничипурук А.П. Магнитные свойства термообработанных сталей. Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 219 с.
- 15. Матюк В.Ф. Влияние технологии производства листового проката низкоуглеродистых качественных сталей на их структурное состояние и взаимосвязь между механическими и магнитными свойствами (обзор). – Неразрушающий контроль и диагностика, 2011, № 1, с. 3–31.
- 16. Förster F., Zizelmann G. Die schnelle zerstörungsfreie Bestimmung der Blechanisotropie mit dem Restpunktpolverfahren – Zeitschrift für Metallkunde, 1955. – Bd. 45, H 4, s. 245–249.
- 17. Heptner H., Stroppe H. Magnetische und magnetinduktive werkstoffprufung. Leipzig, 1965.
- 18. Förster F. Ein Verfahren zur Messung von magnetischen Gleichfeldern und Gleichfelddifferenzen und seine Anwendung in der Metallforschung und Technik. Zeitschrift für Metallkunde, Band 46, H. 5, 1955, S. 358–370.
- 19. Матюк В.Ф., Чурило В.Р., Стрелюхин А.В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном поле методом пространственных интегральных уравнений. II. Ферромагнитный диск в поле накладного соленоида. – Дефектоскопия, 2003, № 12, с. 59–66.
- 20. Федорищева Э.Э., Фридман Л.А., Табачник В.П., Чернова Г.С. Нормальная составляющая остаточного магнитного поля над поверхностью массивного тела. – Дефектоскопия, 1982, № 2, с. 23–29.
- 21. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Исследование возможности отстройки от влияния изменений зазора между преобразователем и контролируемым материалом при импульсном магнитном методе контроля. Дефектоскопия, 1981, № 6, с. 74–79.
- 22. Томилов Г.С. Магнитный контроль структуры и твердости стальных деталей по измерениям локального поля остаточной намагниченности. Дефектоскопия, 1966, № 4, с. 70–78.
- 23. Мельгуй М.А., Востриков А.А., Зборовский А.А. Контроль механических свойств листового проката сталей магнитным методом. Дефектоскопия, 1971, № 3, с. 10-15.
- Федорищева Э.Э., Фридман Л.А., Табачник В.П., Чернова Г.С. Нормальная составляющая магнитного поля над намагниченным участком массивного тела. – В кн.: IX Всесоюзная научно-техническая конференция «Неразрушающие физические методы и средства контроля», 26–28 мая (Тезисы докладов) Секция В. Магнитные методы, Минск, 1981, с. 42–45.
- 25. Федорищева Э.Э., Фридман Л.А., Табачник В.П., Чернова Г.С. Тангенциальная составляющая остаточного магнитного поля над ферромагнитным телом, намагниченным стержневым электромагнитом. – Дефектоскопия, 1983, № 7, с. 3–9.
- 26. Федорищева Э.Э., Табачник В.П., Чернова Г.С. Остаточное магнитное поле изделий разной толщины, намагниченных стержневым электромагнитом. – Дефектоскопия, 1991, № 1, с. 23–32.
- 27. Томилов Г.С. Исследование распределения индукции в массивных стальных изделиях при помощи намагничивания их при помощи приставных электромагнитов. – Дефектоскопия, 1966, № 3, с. 77–85.
- 28. Федорищева Э.Э., Фридман Л.А., Табачник В.П., Чернова Г.С. Индукция на по-

верхности массивного тела под полюсом электромагнита со стержневым сердечником. – Дефектоскопия, 1980, № 3, с. 67–78.

- 29. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Оленович Т.В. Топография поля остаточной намагниченности и его градиента при импульсно-локальном намагничивании. – Дефектоскопия, 1981, № 1, с. 37–42.
- 30. Матюк В.Ф. Топография поля остаточной намагниченности над поверхностью ферромагнитного листа, локально намагниченного полем накладного соленоида. – Дефектоскопия, 1995, № 11, с. 60–69.
- 31. Матюк В.Ф., Стрелюхин А.В. Особенности влияния длительностей фронтов импульсов при локальном намагничивании плоских изделий на нормальную составляющую поля остаточной намагниченности. І. Влияние длительности заднего фронта. – Дефектоскопия, 1997, № 9, с. 42–49.
- 32. Стрелюхин А.В., Матюк В.Ф. Особенности распределения тангенциальной составляющей поля остаточной намагниченности изделий плоской формы при их локальном намагничивании импульсами магнитного поля с разной длительностью фронтов. – Дефектоскопия, 1998, № 8, с. 40–46.
- 33. Матюк В.Ф., Чурило В.Р., Стрелюхин А.В. Численное моделирование магнитного состояния ферромагнетика в неоднородном постоянном поле методом пространственных интегральных уравнений. І. Описание методики расчета. – Дефектоскопия, 2003, № 8, с. 71–84.
- 34. Сандомирский С.Г., Цукерман В.Л., Линник И.И., Сандомирская Е.Г. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля. – Контроль. Диагностика, 2004, № 8, с. 27-31.
- 35. Акулов Н.С., Козлов В.С., Шукевич А.К. Метод локального неразрушающего контроля твердости и глубины цементации. В кн.: Исследования по физике металлов и неразрушающим методам контроля. Минск: Наука и техника, 1968, с. 74–78
- 36. Макаров Г.Н. Прибор для контроля качества термообработки методом точечного полюса. – В кн.: Магнитные методы неразрушающего контроля (Материалы Всесоюзной научно-технической конференции «Современные методы и средства контроля и качества материалов и изделий без разрушения, г. Минск, ноябрь 1970 г.) – М.: 1970, с. 51–525.
- 37. Бида Г.В., Михеев М.Н., Неизвестнов Б.М. Прибор для контроля качества термической и химико-термической обработки стальных и чугунных изделий по кажущейся остаточной намагниченности. Дефектоскопия, 1973, № 6, с. 103-104.
- 38. Акулов Н.С., Мельгуй М.А. Устройство для определения твердости ферромагнитных изделий. Авт. свид. СССР № 331303. – Бюл. изобр., 1972, № 9, с. 129.
- 39. Слободянский Б.Г. Устройство для феррозондового контроля физикомеханических свойств металлов методом точечного полюса. – Авт. свид. № 335599. – Бюл. изобр., 1972, № 13, с. 183.
- 40. Слободянский Б.Г. Точечный контроль коэрцитивной силы. В кн.: Неразрушающий контроль электромагнитными методами. Ч. І. М.: МДНТП, 1971, с. 118-121.
- 41. Слободянский Б.Г. Импульсное намагничивание точечного полюса. В кн.: Проблемы неразрушающего контроля. Кишинев, Всес. НИИ по разработке неразрушающих методов и средств контроля качества материалов. Кишинев,

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ_

1973, c. 240-245

- 42. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Влияние режима намагничивания и размеров контролируемого объекта на величину градиента остаточного магнитного поля. – Дефектоскопия, 1980, № 7, с. 17–22.
- 43. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д. Погрешность, вносимая изменением зазора при импульсно-локальном магнитном контроле. – Дефектоскопия, 1984, № 2, с. 41–45.
- 44. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Способы отстройки от влияния зазора при импульсном магнитном методе контроля. – В кн.: "Дефектоскопия-89". Сборник докладов. Т. 2. Пловдив, 1989, с. 20–24.
- 45. Матюк, В.Ф. Особенности влияния амплитуды и числа импульсов магнитного поля на величину градиента нормальной составляющей напряженности поля остаточной намагниченности при локальном намагничивании толстых изделий. Дефектоскопия, 1996, № 3, с. 18–24.
- 46. Матюк, В.Ф. Использование аномальной зависимости градиента нормальной составляющей поля остаточной намагниченности для контроля механических свойств изделий с защитными неметаллическими покрытиями. Дефектоскопия, 1996, № 3, с. 30–36.
- 47. Мельгуй, М.А., Кратиров В.Б. Аномальный гистерезис поля остаточной намагниченности и его градиента при намагничивании ферромагнетика импульсным магнитным полем, – Дефектоскопия, 1986, № 12, с. 64–70.
- Мельгуй М.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-2А. В кн.: Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности. – Минск: Наука и техника, 1973, с. 81–90.
- 49. Мельгуй М.А., Мальцев В.Л., Пиунов В.Д., Цысецкий И.А. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4. – Дефектоскопия, 1979, № 3, с. 29–32.
- 50. Мельгуй М.А., Пиунов В.Д., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4А. Дефектоскопия, 1986, № 11, с. 63–67.
- 51. Матюк В.Ф., Мельгуй М.А., Осипов А.А., Пиунов В.Д., Кулагин В.Н. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М. Дефектоскопия, 2003, № 3, с. 47–53.
- 52. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5. Дефектоскопия, 1979, № 11, с. 90–95.
- 53. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Крутикова Л.А., Шитова Г.М., Алексеева В.К. Контроль горячекатаного проката сталей 3сп и 10сп с помощью приборов типа ИМА-5А. Заводская лаборатория, 1988, т. 54, № 4, с. 65–68.
- 54. Мельгуй М.А., Матюк В.Ф., Олех Я.А., Цукерман В.Л. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б. В кн.: Научно-технические достижения. Межотраслевой научно-техн. сборник. М.: ВИМИ, 1990, № 4, с. 41–44.16.
- 55. Матюк В.Ф. Состояние и перспективы метрологического обеспечения средств магнитной структуроскопии. В кн.: Метрология–2009. Доклады Междуна-родной научно-практич. конф.– Минск: БелГИМ, 2009, с. 294–298.

Статья поступила в редакцию 22.05.12

ПЯТЫЙ КОНКУРС СПЕЦИАЛИСТОВ НК РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ – СОСТОЯЛСЯ!

Филиппов К.А.

председатель жюри Республиканского конкурса по неразрушающему контролю на присвоение звания «Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь»

Прошедший с 14 по 18 мая в г. Минске, уже пятый по счету, конкурс на присвоение звания "Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь" является важнейшим элементом обеспечения промышленной безопасности, определения качества выпускаемой продукции и производственной деятельности предприятий в целом. Конкурс в первую очередь поднимает престиж как самих предприятий, выпускающих качественную продукцию, так и специалистов, обеспечивающих контроль качества, позволяет объективно оценить квалификацию и общий уровень профессионального мастерства этих специалистов. Во-вторых, он позволяет определить лучших и простимулировать на дальнейшее развитие тех, чья квалификация пока на недостаточно высоком уровне.

Весь конкурс проходил в г. Минске на базе двух организаций – ГНУ "Институт прикладной физики" Национальной академии наук Республики Беларусь и ООО "Научно-производственная компания "Сфера промышленной безопасности" с участием Департамента по надзору за безопасным ведением работ в промышленности МЧС Республики Беларусь (Госпромнадзор).

Возможность доказать профессиональное мастерство в областях визуального и измерительного, ультразвукового, радиографического, магнитопорошкового, капиллярного и вихретокового контроля выразили желание не только специалисты, но и руководители таких предприятий как: ОАО "ГСКБ по комплексу оборудования для микроклимата"; УП "Витебское отделение БелЖД "Витебскгрузсервис"; ОАО "Гомельский химический завод"; ОАО "Солигорский завод технологического оборудования"; РУП "Минскэнерго" филиал "Минские тепловые сети"; ЗАО "Гидродинамика"; ОАО "Белгорхимпром"; БНТУ, "Научно-исследовательская часть"; ОАО "Трест № 26 Железобетонмонтаж"; РУП "Гомельэнерго" филиал "Советлогорская ТЭЦ"; ОАО "Белорусский металлургический завод"; ОАО "Белтрансгаз" РНУ "Белгазэнергоремонт"; РУП "Витебскэнерго" филиал Лукомльская ГРЭС, филиал "Новополоцкая ТЭЦ". За это активное участие им отдельное "СПАСИБО" и награждение дипломом от имени Белорусской ассоциации неразрушающего контроля и технической диагностики (БАНКиТД).

Результаты конкурса показали, что работа в области неразрушающего контроля проводится не напрасно, уровень профессионализма специалистов неразрушающего контроля растет из года в год или поддерживается на достаточно высоком уровне. А это, в свою очередь, и является гарантией безопасной эксплуатации промышленных объектов.

Задача обеспечения промышленной безопасности в условиях продолжающегося физического и морального износа оборудования на опасных производственных объектах, подконтрольных Госпромнадзору Республики Беларусь, и отсутствия средств на его замену и реконструкцию обусловливает повышение роли неразрушающего контроля как одного из основных факторов, определяющих техническое состояние указанных объектов, возможность и сроки их дальнейшей эксплуатации

Развитие научно-технического прогресса в областях промышленного производства с повышенным уровнем опасности и решение задач по поддержанию высокой эксплуатационной надежности опасных производственных объектов требуют совершенствования и более широкого использования неразрушающих методов контроля.

Активное использование неразрушающего контроля в процессе изготовления, монтажа, строительства, ремонта и эксплуатации технических устройств, зданий и сооружений позволяет предотвратить внеплановые остановки и аварии, что особенно важно для опасных производственных объектов, так как аварии на них наносят большой вред здоровью и жизни людей, окружающей среде и приводят к значительному материальному ущербу.

И, наконец, мы переходим к самому приятному и волнующему – представлению специалистов неразрушающего контроля высшей пробы, победителей Пятого конкурса на присвоение звания "Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь", с вручением грамот:

в номинации "**ультразвуковой контроль**":

1 место – Булич Алексей Сергеевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельские тепловые сети";

2 место – Пономарчук Владимир Петрович РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельские тепловые сети"; 3 место – Чечуев Владимир Николаевич РУП "Витебскэнерго" филиал Лукомльская ГРЭС;

3 место – Чупин Евгений Александрович РУП "Витебскэнерго" филиал Лукомльская ГРЭС;

в номинации "**радиографический контроль**":

1 место – Милюша Игорь Владимирович ОАО "Трест № 26 Железобетонмонтаж";

2 место – Ющенко Александр Николаевич ОАО "Гомельский химический завод";

3 место – Адамович Татьяна Владимировна ОАО "Головное специализированное конструкторское бюро по комплексу оборудования для микроклимата";

в номинации "**ультразвуковая толщинометрия**":

1 место – Владыкин Сергей Иванович РУП "Гомельэнерго" филиал "Светлогорская ТЭЦ"";

2 место – Храмцов Николай Васильевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельская ТЭЦ-2;

3 место – Стасевич Сергей Иванович БНТУ, "Научноисследовательская часть";

в номинации "**визуальный измерительный контроль**":

1 место – Булич Алексей Сергеевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельские тепловые сети";

1 место – Храмцов Николай Васильевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельская ТЭЦ-2;

2 место – Висмонт Дмитрий Сергеевич РУП "Минскэнерго" филиал "Минские тепловые сети";

3 место – Лешков Олег Васильевич ОАО "Белгорхимпром";

в номинации "капиллярный контроль":

1 место – Чечуев Владимир Николаевич РУП "Витебскэнерго" филиал Лукомльская ГРЭС;

2 место – Висмонт Дмитрий Сергеевич РУП "Минскэнерго" филиал "Минские тепловые сети";

3 место – Столяров Евгений Владимирович ОАО "Белтрансгаз" РНУ "Белгазэнергоремонт";

в номинации "магнитопорошковый контроль":

1 место – Владыкин Сергей Иванович РУП "Гомельэнерго" филиал "Светлогорская ТЭЦ"";

2 место – Храмцов Николай Васильевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельская ТЭЦ-2;

3 место – Столяров Евгений Владимирович ОАО "Белтрансгаз" РНУ "Белгазэнергоремонт";

в общем зачете, по результатам участия во всех номинациях Пятого конкурса на присвоение звания "Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь" 2012 года, с вручением памятных призов и почетных грамот, признаны победителями:

1 место – Храмцов Николай Васильевич РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельская ТЭЦ-2;

2 место – Чечуев Владимир Николаевич РУП "Витебскэнерго" филиал Лукомльская ГРЭС;

3 место – Пономарчук Владимир Петрович РУП "Гомельэнерго" филиал "Гомельские тепловые сети";

3 место – Столяров Евгений Владимирович ОАО "Белтрансгаз" РНУ "Белгазэнергоремонт".

Поздравляю всех с завершением Пятого конкурса на присвоение звания "Лучший специалист неразрушающего контроля Республики Беларусь", желаю успехов в работе, хорошего настроения и благополучия.

Статья поступила в редакцию 24.05.12

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВИБРАЦИОННЫЙ СТЕНД С ГОРИЗОНТАЛЬНО СКОЛЬЗЯЩИМ СТОЛОМ

1. Назначение

1.1. Электродинамический вибрационный стенд с горизонтально скользящим столом предназначен для испытания изделий на воздействие вибрации в вертикальной и горизонтальной плоскостях.



2. Технические данные

2.1. Номинальное усилие (на синусе): 7000 кг
Номинальное усилие (случайные вибрации): 7000 кг
Диапазон частот: 5 – 2200 Гц
Максимальное ускорение на пустом столе: 100 g
Максимальная скорость: 1,8 м/сек
Максимальное перемещение стола (пик-пик): 51 мм
Максимальная полезная нагрузка на стол (в верт. положении): 1000 кг
Масса подвижной части якоря: 70 кг
Основная резонансная частота: 1833 Гц
Суммарная потребляемая мощность
системы и параметры электропитания: 95,5 кВт, 380 В, 50 Гц, 3 фазы;
4-х канальная цифровая система управления VR8500-4 обеспечивает

- синусоидальная вибрация;

ПРИБОРЫ НК И ТД_

- широкополосная случайная вибрация (ШСВ);

- удары стандартных форм;

- постпроцессорный анализ;

- поиск резонанса и выдержка на нём;

-система имитации генератора синусоидального сигнала;

-воспроизведение удара по ударному спектру.

2.2. Габаритные размеры и вес

Размеры вибратора:	2525х1718х 1293 мм
Размеры усилителя:	850х610х 1918 мм
Размеры вентилятора:	1310x100 x2250 мм
Вес вибратора:	6900 кг
Вес усилителя:	870 кг
Вес вентилятора:	350 кг

3. Комплект поставки

3.1. Электродинамический вибростенд

ES-70-480 /DA-70/BT1000М-3 в комплекте:

- вибратор ES-70-480 с воздушным охлаждением;
- горизонтальный скользящий стол BT1000M-3;
- усилитель мощности DA-70;
- вентилятор воздушного охлаждения с гибким воздуховодом B-7000;
- принадлежности (согласно упаковочного листа);
- ЗИП.

3.2. 4-х канальная цифровая система управления виброиспытаниями VR8500-4 в комплекте:

- системный модуль с датчиками и соединительными кабелями;
- ПО для проведения испытаний на синусоидальную вибрацию, ШСВ и классический удар
- 3.3. Комплект датчиков 351СО3
- 3.4. Руководство по эксплуатации.

Разработчик – ООО «ЕМТ» (Россия), Донглинг Вибрейшен Тест Инструмент Ко (Китай)

Изготовитель – Государственное предприятие «<u>Диатех</u>», Донглинг Вибрейшен Тест Инструмент Ко (Китай)



Артемьев Валентин Михайлович

Artemiev Valentin доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Беларуси ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», главный научный сотрудник Тел.: +(375 17) 284 24 32, e-mail: artemiev@iaph.bas-net.by



Короткевич Зоя Марковна Korotkevich Z.M. ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», аспирантка Тел. +(375 17) 284 24 30, e-mail: kzm@iaph.bas-net.by



Матюк Владимир Федорович Matyuk V.F.

доктор технических наук ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», заведующий лабораторией Тел. +(375 17) 284 18 55, e-mail: matyuk@iaph.bas-net.by



Наумов Александр Олегович Naumov Alexander кандидат физико-математических наук ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси», заведующий сектором Тел.: +(375 17) 294-91-57



Филиппов Константин Александрович

кандидат технических наук ООО «Научно-производственная компания «Сфера промышленной безопасности», зам. директора по качеству Тел.: +375 17 213-29-31, +375 29 655-20-01
Правила для авторов научно-практического журнала «Неразрушающий контроль и диагностика»

Для публикации оригинальной статьи авторы должны представить в редакцию следующие материалы:

1. Авторское заявление с указанием контактной информации (в электронном и бумажном виде).

2. Направление от организации, в которой выполнялась работа (в бумажном виде на бланке организации). Направление не требуется, если работа выполнялась за рубежом.

3. Файл с текстом статьи в формате WinWord, а также в бумажном виде или в электронном в формате pdf. Если одновременно с русским текстом статьи по желанию авторов публикуется ее английский перевод, он представляется отдельно.

4. Файлы в формате WinWord с текстом аннотации на русском и английском языках. Перевод на английский язык осуществляется авторами. Каждая аннотация, кроме собственно текста, должна включать в себя заглавие статьи, фамилии и инициалы авторов, также на русском и английском языках.

5. Файл в формате WinWord, в котором следует указать информацию для Авторского указателя:

- на русском языке – сведения об авторах (фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звание, должность, место работы, телефон, факс, адрес электронной почты и другая контактная информация по усмотрению автора);

- на английском языке – транслитерацию фамилий и имен авторов, а также название учреждений, где выполнялась работа.

6. Фотографии авторов в электронном виде для размещения в Авторском указателе. Фамилия автора должна входить в имя файла с фотографией.

Бумажные версии документов могут быть представлены в редакцию любым из следующих способов:

- отправлены по факсу редакции:(+375 17) 284 17 40;

- присланы обычной почтой или переданы непосредственно по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16, Государственное предприятие «Диатех», редакция журнала «Неразрушающий контроль и диагностика».

Электронные версии документов должны быть присланы в редакцию по электронной почте на адрес *info@science.by*.

К публикации в журнале «Неразрушающий контроль и диагностика» принимаются статьи, прошедшие рецензирование. Поступившая в редакцию рукопись направляется по выбору редакции на отзыв специалисту в данной области исследований. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала на основании экспертных оценок рецензентов с учетом соответствия представленных материалов тематической направленности журнала, их научной значимости и актуальности. Рукопись, получившая отрицательные отзывы двух независимых рецензентов, решением редколлегии отклоняется.

Статьи должны быть написаны на русском (или английском) языке, отредактированы и оформлены в соответствии с нижеследующими требованиями.

Основной текст статьи

Каждая статья должна представлять собой файл, содержащий текст, набранный в редакторе WinWord, шрифт Cambria, кегль 14 пунктов, 1 интервал. При отсутствии инсталлированного шрифта Cambria допустимо использовать шрифт Times New Roman. Должен быть включен режим автоматического переноса.

Перед текстом статьи отдельной строкой в левом верхнем углу обязательно должен быть приведен код универсальной десятичной классификации (УДК) тематики статьи (шрифт – кегль 12).

Статья начинается с заголовка, который пишется строчными буквами полужирным шрифтом размером 16 пунктов. Далее следует список авторов в формате «фамилия, инициалы», который пишется полужирным шрифтом 14 пунктов. Имена авторов разделяются запятыми.

Текст аннотации в виде абзаца с выравниванием по ширине с отступами 12,5 мм справа и слева шрифтом 12 пунктов.

Страницы статьи не должны быть пронумерованы. Поля на странице должны быть: левое и правое – по 25 мм, верхнее – 30 мм, нижнее – 32 мм.

Графические иллюстрации

Таблицы, иллюстрации и подписи к ним размещаются в тексте статьи при первом их упоминании. При этом следует избегать использования опции «обтекание текста».

Таблицы снабжаются тематическими заголовками и нумеруются арабскими цифрами в порядке их упоминания в тексте. Все графы в таблицах должны иметь заголовки. Сокращение слов в таблицах не допускается. Все аббревиатуры должны быть расшифрованы в сносках к таблице.

Графики и схемы должны выполняться с помощью графического редактора CorelDraw. Использование графических средств Microsoft Office крайне нежелательно из-за частых искажений рисунков при верстке, преобразовании в pdfформат и печати. Рисунки следует присылать в виде отдельных файлов с сохранением форматов, использованных для их создания. Недопустимо использовать при создании рисунков «волосяные» линии (1/4 пункта). Эти линии хорошо видны на экране монитора, но исчезают в печатной версии документа.

Фотографии представляются в виде отдельных файлов в форматах jpeg, tiff, bmp, png с разрешением 300-600 dpi.

Штриховые рисунки, выполненные от руки, должны быть отсканированы в режиме bitmap с разрешением не ниже 600 dpi и сохранены в формате tiff.

Формулы

Математические формулы набираются в WinWord встроенным редактором формул, в качестве которого в последних версиях WinWord используется упрощенный вариант редактора формул MathType. В случае недостаточности упрощенного варианта необходимо инсталлировать полную коммерческую версию MathType. Уравнения располагаются по центру строки и нумеруются арабскими цифрами в круглых скобках в порядке их упоминания в тексте. Номера уравнений выравниваются по правому краю строки. Уравнения отделяются от текста сверху и снизу одной пустой строкой. При написании нескольких уравнений они также разделяются пустой строкой.

B HOMEPE

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ	3
Реконструкция изображений в нелинейной динамической томографии. Часть 1: Нелинейные модели изображений <i>Наумов А.О., Артемьев В.М.</i>	3
Информативные параметры для магнитного контроля каче- ства закалки инструментальной углеродистой стали У8А <i>Короткевич З.М.</i>	17
Приборы магнитной структуроскопии на основе локального однополярного импульсного намагничивания Матюк В.Ф.	29
В ОРГАНИЗАЦИЯХ НК И ТД	65
Пятый конкурс специалистов НК Республики Беларусь – со- стоялся! <i>Филиппов К.А.</i>	65
ПРИБОРЫ НК И ТД	69
Электродинамический вибрационный стенд с горизонтально скользящим столом	69
Авторский указатель Правила для авторов	71 72

Пятый конкурс специалистов НК Республики Беларусь (стр. 65)



