

DOI: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-102-110

УДК 620.179.14

В. С. Безкорвайный, В. В. Яковенко, Ю. В. Ливцов
Луганский национальный университет им. Владимира Даля
квартал Молодежный, 20-а, г. Луганск, 91034, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Аннотация. Наиболее распространенным методом упрочнения поверхностей осей подвижного состава является обработка холодным пластическим деформированием путем накатки роликами. К основным параметрам технологического процесса после накатывания относятся микротвердость поверхностного слоя металла оси и его глубина. Для контроля поверхностного слоя металла применяется способ, основанный на вырезании продольных штифтов и контроле твердости по методу Виккерса. Существующие методы неразрушающего контроля базируются на измерении индукции и других магнитных величин в объеме сердечника намагничивающего устройства. Это вносит методическую погрешность и ограничивает возможности определения структуры обрабатываемого материала.

Цель работы – теоретическое и экспериментальное исследование метода контроля параметров упрочненного слоя оси при помощи анализа характеристик магнитного поля рассеяния намагниченного локального участка поверхности оси до и после обработки накаткой роликами.

Предложен метод определения толщины упрочненного слоя металла оси подвижного состава, основанный на измерении параметров магнитного поля рассеяния намагниченного локального участка до и после обработки. Для обоснования предлагаемого метода проведено математическое моделирование магнитного поля рассеяния локального намагниченного участка оси.

Контроль упрочненного слоя металла выполняется намагничиванием локального участка оси электромагнитом с последующим измерением напряженности магнитного поля рассеяния. Определяется максимальное значение горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля, которое является информативным параметром. Разработана математическая модель магнитного поля намагниченного участка, приведены результаты численных и натурных экспериментов. Оценено расхождение экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов.

Метод дает возможность контролировать толщину упрочненного слоя металла и качество упрочнения оси подвижного состава.

Ключевые слова: упрочнение металла, магнитное поле, электромагнит, феррозонд, интегральное уравнение, намагниченность, эксперимент

Для цитирования: Безкорвайный В. С., Яковенко В. В., Ливцов Ю. В. Определение толщины упрочненного слоя металла магнитным методом // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 6. С. 102–110. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-102-110

V. S Bezkorovayniy, V. V. Yakovenko, Y. V. Livtsov
Luhansk National University named after Vladimir Dahl
20-a, Molodezhnyi Quarter, 91034, Lugansk, Ukraine

DETERMINATION OF HARDENED METAL LAYER THICKNESS USING MAGNETIC METHOD

Abstract. The routine method to control metal surface layer is Vickers hardness test method. The existing nondestructive testing methods are based on measuring induction density and other magnetic quantities in magnetizer core. This causes the method error and restricts the ability to determine the structure of the processed material. The paper provides theo-

retical and experimental investigation of the method for controlling the hardened axis layer parameters by analyzing characteristics of stray magnetic field of the axis magnetized local surface area before and after rouletting. A method is proposed for determining the hardened metal layer thickness of the rolling stock axis, based on measuring the parameters of the magnetized local area stray magnetic field before and after processing. To justify the proposed method, mathematical modeling of stray magnetic field of the axis local magnetized section is performed before and after processing. Inspection for the hardened metal layer is performed using magnetization of the axis local segment with electromagnet, followed by measuring the stray magnetic field strength. The maximum value of the horizontal magnetic force is determined, which is an informative parameter. A mathematical model is developed for the magnetized section magnetic field, the results of numerical and field experiments are presented. The discrepancy between the experimental data and the results of theoretical calculations is estimated. The method makes it possible to control the thickness of the hardened metal layer and the quality of the hardening of the rolling stock axis.

Key words: hardening of metal, magnetic field, electromagnet, ferro-gap, integral equation, magnetization, experiment

For citation: Bezkorovayniy V. S., Yakovenko V. V., Litsov Yu. V. Determination of Hardened Metal Layer Thickness Using Magnetic Method. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2018, no. 6, pp. 102–110. doi: 10.32603/1993-8985-2018-21-6-102-110 (In Russian)

Введение. Среди методов упрочнения поверхностей осей подвижного состава наиболее распространена обработка холодным пластическим деформированием с помощью накатки роликами [1], [2]. К основным параметрам технологического процесса накатывания относятся микротвердость и глубина поверхностного слоя, которые в настоящее время контролируются путем вырезания из оси продольных штифтов. Твердость поверхностного слоя металла при таком способе определяется по методу Виккерса.

Качество упрочненного слоя металла определяется также коэрцитиметрическим методом, который не требует разрушения металла [3]–[6]. Все существующие методы основаны на измерении индукции и других магнитных величин в объеме сердечника намагничивающего устройства [7], [8]. Это не только вносит методическую погрешность, но и ограничивает возможности определения структуры обрабатываемого материала. Полученные данные о магнитных характеристиках верхнего слоя обработанной роликами оси сравниваются с данными некоторой усредненной структуры металла, что также вносит погрешность. Так, магнитные характеристики различных осей могут отличаться на 30–50 %.

Поэтому предлагается метод определения параметров упрочненного слоя металла оси, основанный на измерении параметров магнитного поля рассеяния намагниченного локального участка оси непосредственно во время обработки до упрочнения металла и сразу после нее.

Для обоснования предлагаемого метода проведено математическое моделирование магнитного поля рассеяния локального намагниченного участка оси до обработки и после нее. Намагничивание

производится П-образным электромагнитом, измерение магнитного поля рассеяния – феррозондами.

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное обоснование метода контроля параметров упрочненного слоя оси при помощи анализа характеристик магнитного поля рассеяния намагниченного локального участка поверхности оси до обработки накаткой роликами и после нее.

Материалы и результаты исследований. Процедура контроля заключается в следующем. Участок оси подвижного состава перед обработкой роликами намагничивается П-образным электромагнитом. Намагниченный участок в дальнейшем называется меткой. Электромагнит удаляется с поверхности детали, и магнитное поле рассеяния метки измеряется двумя феррозондами, один из которых измеряет горизонтальную составляющую вектора напряженности поля, а второй – вертикальную. Феррозонд перемещают вдоль метки.

Данные о параметрах магнитного поля фиксируются в числовой форме. После удаления с поверхности оси и измерения параметров магнитного поля метки происходит упрочнение поверхности детали. Обработка происходит при одном проходе роликов по поверхности оси [9]. После обработки происходит повторное измерение параметров поля рассеяния феррозондов вышеописанным методом. Затем, сравнивая параметры магнитного поля рассеяния до обработки и после нее, оценивают толщину упрочненного слоя и его твердость.

При построении математической модели магнитного поля метки делаются следующие допущения: магнитный материал оси считается изотропным, процесс определения магнитных характеристик материала – статическим.

Поскольку процедуру расчета поля требуется проводить неоднократно, математическая модель магнитного поля должна быть достаточно простой, но обеспечивать достаточную точность расчета. Основой математической модели трехмерного магнитного поля служит пространственное интегральное векторное уравнение [10]

$$\mathbf{H}(Q) = -\frac{1}{4\pi} \left[\int_{S_P} \frac{\mathbf{MnR}_{PQ}}{R_{PQ}^3} dS_P - \int_{V_P} \frac{\text{div } \mathbf{M} \cdot \mathbf{R}_{PQ}}{R_{PQ}^3} dV_P \right] + \mathbf{H}_{\text{ст}}(P), \quad (1)$$

где $\mathbf{H}(Q)$ – напряженность магнитного поля внутри металла; Q, P – точки наблюдения и источника соответственно; S_P – площадь поверхности тела источника; \mathbf{M} – вектор намагниченности; \mathbf{n} – нормаль к поверхности ферромагнитного материала; \mathbf{R}_{PQ} – вектор, проведенный из точки источника в точку наблюдения; V_P – объем тела источника; $\mathbf{H}_{\text{ст}}(P)$ – напряженность стороннего намагничивающего поля.

При разбиении области метки на элементарные объемы (ЭО), представляющие собой параллелепипеды, интегральное уравнение (1) редуцируется к системе алгебраических уравнений [11]

$$\mathbf{H}_i = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^F \sum_{e=1}^6 (\mathbf{M}_j \mathbf{n}_{je}) \int_{S_{ej}} \frac{\mathbf{R}_{ji}}{R_{ji}^3} dS_{je} + \mathbf{H}_{\text{ст}i}, \quad (2)$$

где i, j – точки наблюдения и источника; F – число ЭО; e – сторона параллелепипеда, по которой производится интегрирование.

Намагниченность есть функция напряженности магнитного поля $\mathbf{M}(\mathbf{H})$. Зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ аппроксимируется аналитическими зависимостями, предложенными в [12]. Кривая намагниченности рассчитывается по формуле

$$\mathbf{M}(\mathbf{H}) = \chi_H \frac{\mathbf{H}_c \mathbf{H}}{\mathbf{H}^2 + \mathbf{H}_c^2} + \frac{\mathbf{M}_s}{\pi} \frac{\mathbf{H}^2}{(\mathbf{H}^2 + b\mathbf{H}_c^2)} \times \left(\arctg \frac{\mathbf{H}_c + \mathbf{H}}{\mathbf{H}_0} - \arctg \frac{\mathbf{H}_c - \mathbf{H}}{\mathbf{H}_0} \right), \quad (3)$$

где \mathbf{H} – напряженность магнитного поля в ферромагнитном материале; χ_H – начальная магнитная восприимчивость; \mathbf{H}_c – коэрцитивная сила; \mathbf{H}_0 – начальная напряженность; \mathbf{M}_s – намагни-

ченность насыщения; $b = \frac{\mathbf{M}_s}{\pi} \frac{\arctg(2\mathbf{H}_c/\mathbf{H}_0)}{\mathbf{M}_c - \chi_H \mathbf{H}_c/2} - 1$,

$\mathbf{H}_0 = \mathbf{H}_c / \text{tg} \left(\frac{\mathbf{M}_r \pi}{\mathbf{M}_s 2} \right)$, \mathbf{M}_r – остаточная намагниченность, \mathbf{M}_c – намагниченность при $\mathbf{H} = \mathbf{H}_c$.

Кривая возврата описывается формулой

$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{M}_s}{\pi} \left(\arctg \frac{\mathbf{H}_c - \mathbf{H}}{\mathbf{H}_0} - \arctg \frac{\mathbf{H}_c}{\mathbf{H}_0} \right) + \left(\arctg \frac{\pi \mathbf{H} + \mathbf{H}_c}{2 \mathbf{H}_0} - \arctg \frac{\pi \mathbf{H} - \mathbf{H}_c}{2 \mathbf{H}_0} \right).$$

Магнитное поле вектора напряженности $\mathbf{H}_{\text{ст}}$, создаваемое П-образным электромагнитом, аппроксимируется полем двух полюсов (рис. 1). На рис. 1 показаны: $2a$ – длина проекции полюсного наконечника П-образного электромагнита; $2c$ – ширина проекции полюсного наконечника П-образного электромагнита; $2t$ – расстояние между полюсами полюсного наконечника П-образного электромагнита.

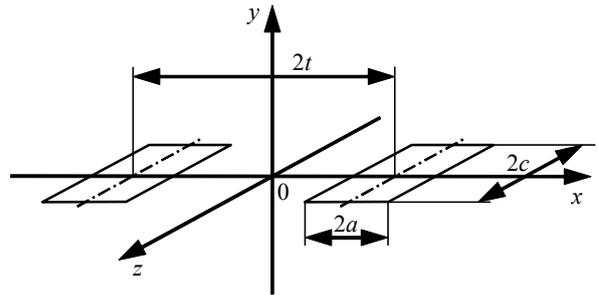


Рис. 1

Составляющие вектора напряженности $\mathbf{H}_{\text{ст}}$ рассчитываются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{ст}z_i} &= \frac{\mathbf{M}_n}{4\pi} \int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{(z_i - z_j) dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} - \\ &- \int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{(z_i - z_j) dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} = \\ &= \frac{\mathbf{M}_n}{8\pi} \left[\ln |x_i - t - x_j + \right. \\ &+ \left. \sqrt{(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2} \right] - \\ &- \ln |x_i + t - x_j + \\ &+ \left. \sqrt{(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2} \right] \Bigg|_{-c}^c \Bigg|_{-a}^a; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{\text{ст}x_i} &= \frac{\mathbf{M}_n}{4\pi} \left[\int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{(x_i - x_j - t) dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} - \right. \\ &\quad \left. - \int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{(x_j - x_i + t) dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} \right] = \\ &= \frac{\mathbf{M}_n}{8\pi} \left[\ln \left| z_i - z_j + \sqrt{(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2} \right| - \right. \\ &\quad \left. - \ln \left| z_i - z_j + \sqrt{(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2} \right| \right]_{-c}^c \Big|_{-a}^a ; \\ \mathbf{H}_{\text{ст}y_i} &= \frac{\mathbf{M}_n}{4\pi} \left[\int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{y_i dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} - \right. \\ &\quad \left. - \int_{-c-a}^c \int_{-a}^a \frac{y_i dz_j dx_j}{\left[(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2 \right]^{3/2}} \right] = \\ &= \frac{\mathbf{M}_n}{4\pi} \left[\operatorname{arctg} \frac{(z_i - z_j)(x_i - x_j - t)}{y_i \sqrt{(x_i - x_j - t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \operatorname{arctg} \frac{(z_i - z_j)(x_i - x_j + t)}{y_i \sqrt{(x_i - x_j + t)^2 + y_i^2 + (z_i - z_j)^2}} \right]_{-c}^c \Big|_{-a}^a , \end{aligned}$$

где \mathbf{M}_n – нормальная составляющая намагниченности; x_i, y_i, z_i – координаты точки наблюдения; x_j, y_j, z_j – координаты точки источника.

Область ферромагнитного металла метки разбивается на ЭО, как показано на рис. 2: i – точка наблюдения; j – точка источника; \mathbf{R}_i – радиус-вектор между началом координат и точкой наблюдения; \mathbf{R}_j – радиус-вектор между началом координат и точкой источника; \mathbf{R}_{ij} – радиус-

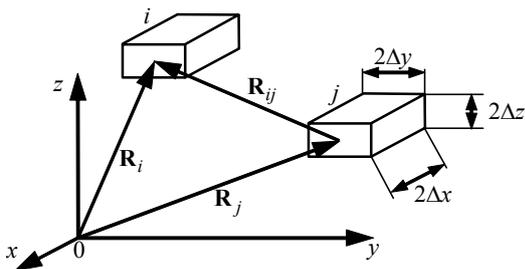


Рис. 2

вектор между точкой источника и точкой наблюдения; $2\Delta x$ – длина ЭО; $2\Delta y$ – ширина ЭО; $2\Delta z$ – высота ЭО.

В каждом ЭО с помощью (3) определяются составляющие вектора намагниченности:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{x_i}^{(o)} &= \mathbf{M}_i^{(o)} \frac{\mathbf{H}_{x_i}^{(o)}}{\mathbf{H}_i^{(o)}} ; \\ \mathbf{M}_{y_i}^{(o)} &= \mathbf{M}_i^{(o)} \frac{\mathbf{H}_{y_i}^{(o)}}{\mathbf{H}_i^{(o)}} ; \\ \mathbf{M}_{z_i}^{(o)} &= \mathbf{M}_i^{(o)} \frac{\mathbf{H}_{z_i}^{(o)}}{\mathbf{H}_i^{(o)}} , \end{aligned}$$

где o – номер элементарного объема.

В свернутом виде система уравнений (2) выглядит следующим образом:

$$\mathbf{H}_i^{(k)} = [C_{ij}] \mathbf{M}_j^{(k)} + \mathbf{H}_{\text{ст}i}; \quad i, j = \overline{1, F}, \quad (4)$$

где k – номер итерации; C – коэффициент.

Коэффициенты системы уравнений (4) имеют аналитические зависимости:

$$\begin{aligned} C_{xx} &= \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(z_j - z_i + z)(y_j - y_i + y)}{(x_j - x_i + x)R} \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \\ C_{yy} &= \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(z_j - z_i + z)(x_j - x_i + x)}{(y_j - y_i + y)R} \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \\ C_{zz} &= \frac{1}{4\pi} \operatorname{arctg} \frac{(x_j - x_i + x)(y_j - y_i + y)}{(z_j - z_i + z)R} \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \\ C_{xy} = C_{yx} &= \frac{1}{8\pi} \ln |z_j - z_i + z + R| \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \\ C_{xz} = C_{zx} &= \frac{1}{8\pi} \ln |y_j - y_i + y + R| \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \\ C_{yz} = C_{zy} &= \frac{1}{8\pi} \ln |x_j - x_i + x + R| \Big|_{-\Delta x}^{\Delta x} \Big|_{-\Delta y}^{\Delta y} \Big|_{-\Delta z}^{\Delta z} ; \end{aligned}$$

$$R = \sqrt{(x_j - x_i + x)^2 + (y_j - y_i + y)^2 + (z_j - z_i + z)^2},$$

где R – область намагничивания.

На каждом последующем $(k + 1)$ -м цикле итераций определяется намагниченность $\mathbf{M}_i^{(k+1)}$ ЭО. Система уравнений (4) решается итерационным способом. Перед решением (4) определяется область метки; в ее объем входят те ЭО, для которых $|\mathbf{H}^{(0)}| < \mathbf{H}_p$, где \mathbf{H}_p – напряженность области Рэлея.

Величина \mathbf{M}_n определяется методом расчета магнитной цепи, состоящей из сердечника П-образного электромагнита с магнитной проницаемостью $\mu(\mathbf{H})$ и его зеркального изображения. Поскольку зависимость $\mu(\mathbf{H})$ нелинейная, расчет ведется итерационным методом:

$$\mathbf{M}^{k+1} = \frac{IW [\mu(\mathbf{M})^{(k)} - 1]}{l_c + l_b \mu(\mathbf{M})^{(k)}}, \quad (5)$$

где I – ток через обмотку намагничивающего устройства; W – число витков обмотки намагничивающего устройства; $\mu(\mathbf{M})$ – зависимость магнитной проницаемости сердечника П-образного электромагнита от намагниченности; l_c – длина сердечника электромагнита; l_b – размер воздушного зазора между полюсами электромагнита и поверхностью контролируемой детали.

Напряженность намагничивающего поля для каждого ЭО определяется из (2) при $\mathbf{H}_{cti} = 0$, т. е.

$$\mathbf{H}_i = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^F \sum_{e=1}^6 (\mathbf{M}_j \mathbf{n}_{je}) \int_{S_{kj}} \frac{\mathbf{R}_{ij}}{R_{ij}^3} dS_{je}.$$

В каждом ЭО определяются усредненные по объему проекции вектора намагничивающего коэффициента

$$\begin{aligned} N_{xi} &= \frac{H_{p\ xi}}{M_{xi}}; \\ N_{yi} &= \frac{H_{p\ yi}}{M_{yi}}; \\ N_{zi} &= \frac{H_{p\ zi}}{M_{zi}}. \end{aligned}$$

Математическая модель магнитного поля каждого ЭО для каждой составляющей вектора \mathbf{M} может быть представлена структурной схемой, показанной

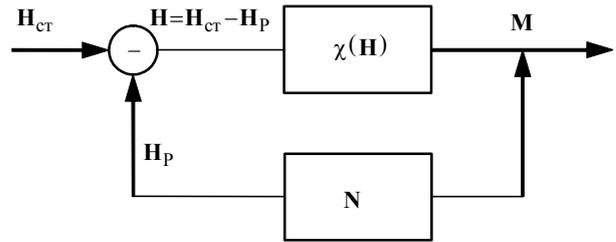


Рис. 3

на рис. 3 [13] (χ – магнитная восприимчивость; \mathbf{N} – вектор намагничивающего коэффициента).

Согласно структурной схеме,

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{H_{ctx} \chi(\mathbf{H})}{1 + N_x \chi(\mathbf{H})}; \\ M_y &= \frac{H_{cty} \chi(\mathbf{H})}{1 + N_y \chi(\mathbf{H})}; \\ M_z &= \frac{H_{ctz} \chi(\mathbf{H})}{1 + N_z \chi(\mathbf{H})}. \end{aligned}$$

Составляющие вектора намагниченности при намагничивании метки можно найти из следующих нелинейных уравнений при различных значениях напряженности намагничивающего поля:

$$\begin{aligned} N_x M_{xi}(\mathbf{H}) + H_{xi} &= H_{ctxi}; \\ N_y M_{yi}(\mathbf{H}) + H_{yi} &= H_{ctyi}; \\ N_z M_{zi}(\mathbf{H}) + H_{zi} &= H_{ctzi}. \end{aligned} \quad (6)$$

В результате решения (6) определяются значения составляющих векторов \mathbf{H}_i и \mathbf{M}_i , при этом используется зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ (3).

При определении остаточного магнитного поля, т. е. при $\mathbf{H}_{ct} = 0$, используются уравнения

$$\begin{aligned} N_{xi} M_{xi}(\mathbf{H}) + H_{p\ xi} &= 0; \\ N_{yi} M_{yi}(\mathbf{H}) + H_{p\ yi} &= 0; \\ N_{zi} M_{zi}(\mathbf{H}) + H_{p\ zi} &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ берется во втором квадранте.

На первом этапе расчета магнитного поля рассеяния метки с помощью зависимости (5) определяются величины \mathbf{M}_n . При необработанной поверхности оси рассчитывается вектор намагниченности в области метки. Предварительно определяются границы области метки, объем метки разбивается на ЭО и численным методом решается система алгебраических уравнений (2). Предварительно в каждом ЭО находится векторная величина \mathbf{H}_{ct} . При решении (2) ис-

пользуется зависимость $\mathbf{M}(\mathbf{H})$ (3). Результат решения (2) есть значение $\mathbf{M}_i(\mathbf{H})$ в каждом ЭО. Значения $\mathbf{M}_i(\mathbf{H})$ позволяют рассчитать составляющие вектора напряженности поля на поверхности оси, т. е. поле рассеяния метки. Рассчитываются также составляющие вектора \mathbf{N} . После определения его составляющих рассчитывается остаточная намагниченность метки (после удаления намагничивающего электромагнита с поверхности оси с помощью решения уравнений (7)).

Напряженности поля рассеяния рассчитывается по формуле

$$\mathbf{H}_l = \frac{1}{4\pi} \sum_{j=1}^F \sum_{e=1}^6 (\mathbf{M}_j \cdot \mathbf{n}_{je}) \int_{S_{ej}} \frac{\mathbf{R}_{il}}{R_{il}^3} dS_{je}.$$

Параметры поля рассеяния метки измеряются феррозондовыми магнитометрами. После обработки поверхности оси магнитная структура верхнего слоя металла разрушается и размагничивается, а область сердцевины оси остается намагниченной. Полагается, что область упрочненного металла ненамагниченная и над нею находится ферромагнитный размагниченный слой металла толщиной Δy , магнитные характеристики которого отличны от исходных (рис. 4).

Согласно методу зеркальных изображений [14], [15] в размагниченном деформацией металле существует намагниченность, причем вектор намагниченности имеет направление, противоположное вектору намагниченности в соседнем нижнем слое металла толщиной Δy . При таком распределении намагниченности в области метки проводится численный расчет, который и составляет второй этап расчета магнитного поля.

После определения направления и значения вектора намагниченности в упрочняемом слое толщиной Δy рассчитывается магнитное поле рассеяния метки после упрочнения верхнего слоя металла. Максимальное значение горизонтальной составляющей вектора напряженности содержит информацию о толщине упрочняемого слоя металла Δy [16], [17].

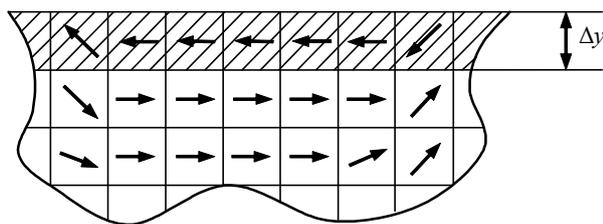


Рис. 4

При численных расчетах использовались следующие данные о параметрах П-образного электромагнита и магнитных характеристиках материала оси: $2a = 0.03$ м; $2b = 0.03$ м; $2t = 0.06$ м; для неупрочненного металла (Сталь 20) –

$$\chi_H = 15;$$

$$\mathbf{M}_S = 1.16 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

$$\mathbf{M}_R = 0.76 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

$$\mathbf{H}_C = 2.65 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

$$\mathbf{M}_C = 0.32 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

для упрочненного металла –

$$\chi_H = 10,$$

$$\mathbf{M}_S = 0.98 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

$$\mathbf{H}_C = 3.5 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

$$\mathbf{M}_C = 0.28 \cdot 10^6 \text{ А/м};$$

число ампер-витков 10^3 А.

Объем метки разбивается на 428 ЭО. Напряженность поля рассеяния метки рассчитывалась на расстоянии 0.008 м от поверхности. Толщина слоя упрочненного металла изменялась в пределах 0...0.006 м. В результате расчета получены данные о горизонтальной и вертикальной составляющих вектора напряженности магнитного поля рассеяния, которые приведены в виде графиков на рис. 5, где обозначены зависимости от x до обработки, при $\Delta y = 3$ мм: 1, 2 – \mathbf{H}_x ; 3, 4 – \mathbf{H}_y . Сплошные линии – теория, штриховые – эксперимент.

Из рис. 5 видно, что горизонтальная составляющая в центре метки имеет максимум, вертикальная равна нулю. Это создает возможность на поверхности оси определить центр метки и ее максимум. Феррозонды с горизонтально расположенными сердечниками предназначены для измерения максимального значения напряженности, феррозонд с вертикально расположенными

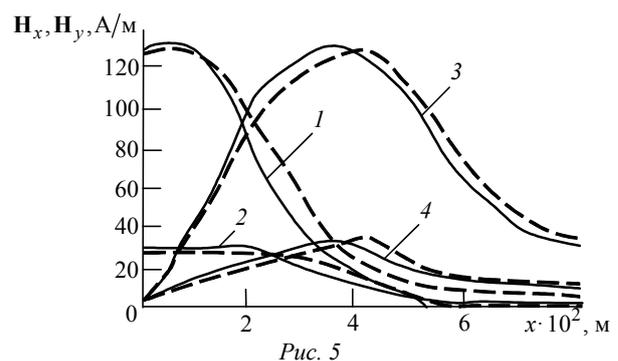


Рис. 5

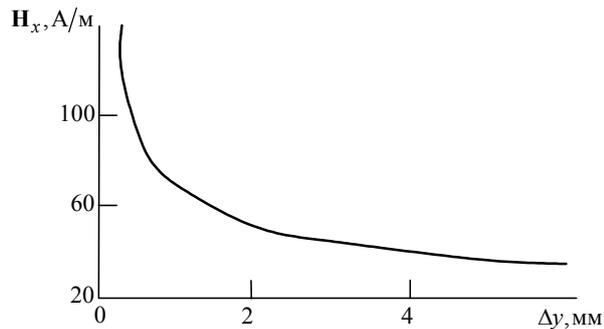


Рис. 6

сердечниками дает возможность определить центр метки, в котором горизонтальная составляющая напряженности имеет максимум $H_{x\max}$. Максимальное значение напряженности – информативный параметр.

На рис. 6 показана зависимость максимального значения горизонтальной составляющей вектора напряженности поля рассеяния от толщины упрочненного слоя Δy . Видно, что при $\Delta y > 2 \cdot 10^{-3}$ м зависимость имеет линейный участок, что дает возможность контролировать толщину упрочняемого слоя в рабочем диапазоне его измерения Δy .

Изменение магнитных параметров упрочненного слоя металла оказывает на порядок меньшее влияние на величину H_{\max} – максимальное значение напряженности $H_y(y)$, поэтому твердость упрочненного слоя металла следует определять коэрцитиметрическим методом [18].

На практике измерение толщины упрочненного слоя металла проводится в следующей последовательности. До обработки оси на ее поверхность ставится электромагнит с П-образным сердечником и подается ток в его обмотку. Происходит формирование метки. После этого электромагнит убирается с поверхности оси и по поверхности перемещается блок феррозондов, состоящий из двух феррозондов с вертикально и горизонтально расположенными сердечниками. При нулевом сигнале феррозонда с вертикальными сердечниками формируется сигнал на измерение максимального значения $H_{x\max}$.

После упрочнения верхнего слоя металла значение $H_{x\max}$ фиксируется повторно. Сравнивая значения $H_{x\max}$ до и после обработки, определяют толщину упрочненного слоя.

Упрочнение накатыванием должно проводиться за один проход двумя роликами – упрочняющим и сглаживающим [19].

Распределение микротвердости в поверхностном слое зависит от технологических режимов и от времени проведения процесса накатывания. При завышенном времени накатывания рост микротвердости на поверхности металла прекращается. Наблюдается рост микротвердости в подповерхностном слое, что отрицательно влияет на контактную выносливость и усталостную прочность обрабатываемого металла.

При натурном эксперименте из оси вырезались образцы с косым срезом под заданным углом, затем методом Викерса делались замеры на поверхности среза. Ввиду трудоемкости эксперимента исследовались два образца. Косые срезы под углом 5° приготавливались притиркой абразивной пастой.

Микротвердость измерялась твердомером ПТМЗ. Контролировалась толщина слоя 3 и 5 мм.

На двух осях подвижного состава проводился натурный эксперимент по определению толщины упрочненного слоя вырезанием образцов металла и предварительным измерением значения $H_{y\max}$.

Расхождение результатов эксперимента не превышает 12 %. Определялось также расхождение экспериментальных данных и результатов теоретических расчетов (рис. 5); оно не превышает 8 % при погрешности измерений 2,5 %.

Выводы. 1. Предложен метод определения толщины упрочненного слоя металла, основанный на измерении магнитного поля рассеяния намагниченного участка оси подвижного железнодорожного состава, который имеет достаточную точность, несложную реализацию и возможность проводить контроль во время технологического процесса.

2. Разработана математическая модель магнитного поля рассеяния, намагниченного электромагнитом с П-образным сердечником, позволяющая установить зависимость между толщиной слоя и максимальным значением горизонтальной составляющей поля рассеяния метки.

3. Зависимость максимального значения горизонтальной составляющей от толщины упрочняемого слоя имеет линейный участок, что дает возможность контролировать качество упрочнения оси подвижного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 11018–2000. Тяговый подвижной состав железнодорожных дорог колеи 1520 мм. Колесные пары. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.
2. Циркунов А. Б., Цигунов А. Е. Классификация дефектов вагонной оси // Железнодорожный транспорт. 1990. № 8. С. 47–49.
3. Михеев М. Н., Фродман А. А., Морозов В. М. О применении коэрцитивных методов с приставными электромагнитами при контроле массивных стальных изделий // Дефектоскопия. 1978. № 8. С. 47–51.
4. Бида Г. В., Ничипурук А. П. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 13–18.
5. Ничипурук А. П., Бида Г. В., Шанурин А. М. О функциональных возможностях магнитного структуроскопа СМ-401 // Дефектоскопия. 2000. № 10. С. 13–18.
6. Lanbe W., Lindow R. Fertigungstechnik und Betrieb. FB: Zeitschr. Berlin: Verl. Technik, 1996. 365 p.
7. Жученко Н. А. Совершенствование систем дефектоскопии деталей ходовой части подвижного состава: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 – приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий. Луганск, 2007. 163 с.
8. Kores V. Electromagnetic testing of railway axle structure // Proc. 10th World Conf. NTD. 1982. Vol. 2. P. 267–274.
9. ГОСТ 33200–2014. Оси колесных пар железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2015.
10. Корбан Н. П. Совершенствование метода интегральных уравнений численного расчета магнитного поля намагниченного тела // Электротехника и энергоэнергетика. 2011. № 1. С. 5–10.
11. Bezkorovaynyy V., Yakovenko V. Mathematical modeling of magnetic stray fields defects ferromagnetic products // ТЕКА. 2013. Vol. 13, № 4. P. 25–32.
12. Курбатов П. А. Метод ограниченных областей для решения задач нелинейной магнитостатики // Электромагнитное поле и системы. 1986. № 118. С. 31–37.
13. Мельгуй М. А. Формулы для описания нелинейных и гистерезистых свойств ферромагнетиков // Дефектоскопия. 1987. № 11. С. 3–10.
14. Швець С. Н., Ливцов Ю. В., Яковенко В. В. Контроль параметров поверхностного слоя металла после накатки роликами // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування. Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції. 10–11 грудня 2015 р. Харків: ТОВ "В справі", 2015. С. 123–124.
15. Математические модели магнитного поля намагниченного поверхностного слоя металла / В. С. Безкоровайный, О. В. Тарасенко, Ю. В. Ливцов, В. В. Яковенко // Электричні машини і апарати. 2014. № 25. С. 1–11.
16. Курбатов П. А., Аринчин А. С. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.
17. Яковенко В. В., Жученко Н. А. Математическая модель остаточной намагниченности локального участка ферромагнитной детали // Праці Луганського відділення міжнародної академії інформатизації. 2006. № 2 (13). С. 100–104.
18. Букреев В. В., Яковенко В. В. Математическое моделирование поля в магнитной системе датчика микротвердости упрочненного поверхностного слоя // Вісник СНУ ім. В. Даля, 2009. № 8 (138). С. 28–35.
19. Филимоненко Н. Н., Карлов Д. Б., Чурносков А. П. Математические модели для расчета намагниченности при определении толщины и твердости верхнего слоя металла, упрочненного способом виброобработки // Вісті Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. 2010. № 3 (145). С. 158–166.

Статья поступила в редакцию 15 октября 2018 г.

Безкоровайный Владимир Сергеевич – кандидат технических наук (2016), доцент кафедры электромеханики Луганского национального университета имени Владимира Даля. Автор 32 научных работ. Сфера научных интересов: приборы и устройства магнитных измерений; магнитный неразрушающий метод контроля ферромагнитных изделий.

E-mail: volk_7@ukr.net

Яковенко Валерий Владимирович – доктор технических наук (1989), профессор (1990), заведующий кафедры электромеханики Луганского национального университета имени Владимира Даля. Заслуженный деятель науки и техники Украины (1991). Автор 86 научных работ. Сфера научных интересов: приборы и устройства магнитных измерений; магнитный неразрушающий метод контроля ферромагнитных изделий.

E-mail: kaf-el-mex@yandex.ru

Ливцов Юрий Владимирович – магистр по специальности "Метрология, измерительная техника, стандартизация и сертификация" (2008), аспирант кафедры электромеханики Луганского национального университета имени Владимира Даля. Автор 11 научных работ. Сфера научных интересов: приборы и устройства магнитных измерений; магнитный неразрушающий метод контроля ферромагнитных изделий.

E-mail: Liwtsoff@yandex.ua

REFERENCES

1. GOST 11018–2000. Traction Railway Stock Wheelsets for 1520 mm Gauge Railways. General specifications. Moscow, *IPK Izdatel'stvo standartov*, 2001. (In Russian)
2. Tsirkunov A. B., Tsigunov A. E. Classification of Defects of the Wagon Axle. Railway Transport. *Zh-D. Transport* [Classification of Car Axle Defects. Railway Transport], 1990, no. 8, pp. 47–49. (In Russian)
3. Mikheev M. N., Frodman A. A., Morozov V. M. On Coercive Method Application Using Attached Electromagnets to Control Solid Steelwork. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1978, no. 8, pp. 47–51. (In Russian)
4. Bida G. V., Nichipuruk A. P. Coercive Force Measurements in Nondestructive Testing. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2000, no. 10, pp. 707–727.
5. Nichipuruk A. P., Bida G. V., Shanurin A. M. SM-40 Magnetic Structuroscope. Nondestructive Testing and Diagnostics. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2000, no. 10, pp. 13–18. (In Russian)
6. Lanbe W., Lindow R. Fertigungstechnik und Betrieb. FB: Zeitschr, 1996, 365 p.
7. Zhuchenko N. A. *Sovershenstvovanie sistem defektoskopii detalei khodovoi chasti podvizhnogo sostava: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Flaw Detection System Development for Rolling Stock Running Gear Elements: dis. ... Ph.D. (tech. sciences)] 05.11.13. Lugansk, 2007, 163 p. (In Russian)
8. Kores V. Electromagnetic Testing of Railway Axle Structure. Proc. 10th World Conf. NTD. 1982, vol. 2, pp. 267–274.
9. GOST 33200–2014 Wheelset Axles of Railway Rolling Stock. General Technical Conditions. Moscow, *Standartinform*, 2015. (In Russian)
10. Korban N. P. Integral Equation Method Development for Magnetized Body Magnetic Field Numerical Calculation. Electrical Engineering and Power Engineering. 2011, no. 1, pp. 5–10. (In Russian)
11. Bezkorovaynyy V., Yakovenko V. Mathematical Modeling of Magnetic Stray Fields Defects Ferromagnetic Products. TEKA-2013, vol. 13, no. 4, pp. 25–32.
12. Kurbatov P. A. Bounded Domain Method for Nonlinear Magnetostatics Problem Solving. *Elektromagnitnoe pole i sistemy* [Electromagnetic Field and Systems], 1986, no. 118, pp. 31–37. (In Russian)
13. Mel'gui M. A. Formulas for Describing Ferromagnet Nonlinear and Hysteresis Properties. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 1987, no. 11, pp. 3–10. (In Russian)
14. Shvets S. N., Litvsov Yu. V., Yakovenko V. V. Inspection for Metal Surface Layer Parameters after Rolling. Mater. of the II All-Ukrainian Scientific and Technical Conference. 2015, pp.123–124. (In Ukrainian)
15. Bezkorovainyi V. S., Tarasenko O. V., Litvsov Yu. V., Yakovenko V. V. Mathematical Models for Magnetized Surface Metal Layer Magnetic Field. *Elektromekhanichni ta Enerhozberihayuchi Systemy* [Electric machines and equipment], 2014, vol. 25, no. 1, pp. 66–75. (In Russian)
16. Kurbatov P. A., Arinchin A. S. *Chislennyi raschet elektromagnitnykh polei* [Electromagnetic Field Numerical Calculation]. Moscow, *Energoatomizdat*, 1984, 168 p. (In Russian)
17. Yakovenko V. V., Zhuchenko N. A. Mathematical Model of Residual Magnetization of Ferromagnetic Part Local Area. Prace of the Lugansk District of the International Academy of Information Technologies. 2006, no. 2(13), pp. 100–104. (In Russian)
18. Bukreev V. V., Yakovenko V. V. Field Mathematical Modeling in Magnetic System of Hardened Surface Layer Microhardness Sensor. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian national university* [Newsletter of SNU n. a. V. Dal]. 2009, no. 8(138), pp. 28–35. (In Russian)
19. Filimonenko N. N., Karlov D. B., Churnosov A. P. Mathematical Models for Calculating Magnetization in Determining Upper Metal Layer Thickness and Hardness, Strengthened using Vibro-Processing Method. View of the National Ukrainian National University n. a. V. Dahl. 2010, no. 3 (145), pp. 158–166. (In Russian)

Received October, 15, 2018

Vladimir S. Bezkorovainy – Ph.D. in Engineering (2016), Associate Professor of the Department of Electromechanics of Lugansk National University named after Vladimir Dal. The author of 32 scientific publications. Area of expertise: magnetic testers and measuring devices; magnetic non-destructive method for ferromagnetic work control.

E-mail: volk_7@ukr.net

Valery V. Yakovenko – D.Sc. in Engineering (1989), Professor (1990), Head of Department of Electromechanics of Lugansk National University named after Vladimir Dal. Honored Scientist and Engineer of Ukraine (1991). The author of 86 scientific publications. Area of expertise: magnetic testers and measuring devices; magnetic non-destructive method for ferromagnetic work control.

E-mail: kaf-el-mex@yandex.ru

Yury V. Litvsov – Master's Degree in Metrology Measuring Equipment, Standardization and Certification (2008), Postgraduate Student of the Department of Electromechanics of Lugansk National University named after Vladimir Dal. The author of 11 scientific publications. Area of expertise: magnetic testers and measuring devices; magnetic non-destructive method for ferromagnetic work control.

E-mail: Liwtsoff@yandex.ua