

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ПАРАМЕТРОВ УПРОЧНЕННОГО СЛОЯ СТАЛИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ МАГНИТНОМ МЕТОДЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ

Дается оценка влияния параметров контролируемой детали магнитным методом неразрушающего контроля на градиент напряженности магнитного поля измерительного преобразователя. Приведена упрощенная конструкция импульсного градиентометрического преобразователя, указаны его параметры для проведения экспериментов. Рассмотрена математическая модель расчета выходного сигнала феррозонда градиентометра, применяемая для получения выходных данных. Исследованы зависимости градиента напряженности магнитного поля от расстояния между датчиком и плоскостью контролируемой детали, от коэрцитивной силы и толщины упрочненного слоя, а также от толщины контролируемой детали. Получены выводы на основании проведенного эксперимента.

Ключевые слова: градиент магнитного поля, напряженность, феррозонд, виброударное упрочнение, неразрушающий контроль, коэрцитивная сила.

Введение. Импульсный магнитный метод контроля механических свойств сталей [1–3] широко используется в практике неразрушающего контроля как в нашей стране, так и за рубежом.

При импульсном магнитном методе изделие намагничивается аксиально симметричным импульсным магнитным полем, направленным перпендикулярно к испытываемой поверхности изделия, повышающим коэрцитивную силу изделия. Затем, после окончания релаксационных процессов, измеряется нормальная составляющая градиента поля остаточной намагниченности, по ее величине судят о значении контролируемого параметра. Для хорошей повторяемости результатов измерений намагничивания производится серией импульсов или после намагничивания импульсным методом производится частичное размагничивание локальной области.

Также в промышленном производстве особое внимание уделяется основополагающим задачам по ресурсосбережению [4], которые необходимо соблюдать при использовании данного вида неразрушающего контроля.

Упрощенная конструкция измерительного импульсного преобразователя показана на рис. 1.

Измерительный преобразователь представляет собой катушку круглого цилиндрического сечения 2, расположенную над контролируемой деталью 1.

Внутри катушки находятся два полуэлемента феррозонда 3, включенные встречно, то есть по градиентометрической схеме. В обмотку катушки подаются импульсы тока амплитудой $0,2 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^3$ А, которые создают у торца катушки поле амплитудой $H = 0,1 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^5$ А/м [5].

Длительность импульсов тока обычно равна 100–2000 мкс. Подается несколько импульсов. Намагниченный под катушкой участок создает поле рассеяния, градиент которого ΔH измеряется феррозондом. Величина градиента поля зависит от амплитуды, длительности и количества намагничивающих импульсов, от толщины промагничиваемого слоя металла, от магнитной силы, а также от геометрических параметров намагничивающей катушки [6].

Цель работы. Теоретическое и экспериментальное обоснование зависимости градиента напряженности магнитного поля от толщины упрочненного слоя и количество упрочненных слоев различной стали.

Модель расчета. Если линейные размеры детали в 3–4 раза превышают размеры катушки измерительного преобразователя, то расчет выходного сигнала можно осуществить по упрощенной методике [7, 8].

Рассчитывается напряженность магнитного поля, создаваемая катушкой с током, по формуле:

$$\begin{aligned} \bar{H}(\rho_M, z_M) = & \bar{I}_p \sum_{k=1}^m \frac{\delta_k}{2\pi} \int_0^\pi r_k \left(\frac{1}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{z_1 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) \cos \alpha d\alpha + \\ & + \bar{I}_p \sum_{k=1}^m \frac{\delta_k}{2\pi} \int_0^\pi \frac{r_k - \rho_M \cos \alpha}{b_k} \left(\frac{z_2 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_2)^2 + b_k^2}} - \frac{z_1 - z_M}{\sqrt{(z_M - z_1)^2 + b_k^2}} \right) d\alpha, \end{aligned} \quad (1)$$

здесь $r_k = \sqrt{r_k^2 + \rho_M^2 - 2r_k \rho}$;

$$\delta_k = \frac{2Iw}{m(z_2 - z_1)(\mu + 1)} ;$$

μ — магнитная проницаемость ферромагнетика;
 M — число бесконечно тонких цилиндров, кото-

рые выбираются их условия $\frac{r_2 - r_1}{m(r_2 + r_1)} \leq 0,1$.

Определяется модуль напряженности магнитного поля:

$$\bar{H}(\rho_M, z_M) = \sqrt{(H_p(\rho_M, z_M))^2 + (H_c(\rho_M, z_M))^2} \quad (2)$$

Намагниченность определяется следующим образом:

$$M = \frac{M_H \cdot M_{rs}}{M_s} \quad (3)$$

где M_H рассчитывается по формуле [9]:

$$\begin{aligned} M_H = & \chi_H \frac{H_{CS} H}{H^2 + H_{CS}^2} + \frac{M_s}{\pi} \cdot \frac{H^2}{(H^2 + kH_{CS}^2)} \times \\ & \times \left(\arctg \frac{H_{CS} + H}{H_0} - \arctg \frac{H_{CS} - H}{H_0} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $H_0 = \frac{H_{CS}}{\operatorname{tg} \left(\frac{M_{rs}}{M_s} \cdot \frac{\pi}{2} \right)}$;

$$k = \frac{M_s}{\pi} \cdot \frac{\arctg \left(2 \frac{H_{CS}}{H_0} \right)}{M_c - \chi_H H_{CS} / 2} - 1 ;$$

χ_H — начальная восприимчивость ($\chi_H = \operatorname{tg} \alpha$);

M_s — намагниченность насыщения;

M_{rs} — остаточная намагниченность;

H_{CS} — коэрцитивная сила по предельной петле гистерезиса;

M_c — величина намагниченность, соответствующая точке на кривой намагниченность при напряженности поля H_{CS} ;

H — напряженность поля, созданного катушкой.

В ферромагнитном пространстве выделяется область, для которой соответствует $H < H_R$ (H_R — напряженность границы области Релея). Эта область разбивается на элементарные области, представляющие собой кольца. Количество колец по координате $\rho - T$, количество слоев по координате $z - F$. Элементарный объем (ЭО) равен:

$$\Delta V_j = 4\pi \cdot \Delta R_{vf}^2 \cdot \Delta z_{vf}; \quad V = \bar{1}, \bar{T}; \quad f = \bar{1}, \bar{F},$$

здесь R_{vf} — ширина v -го слоя, f -го кольца;

Δz_{vf} — толщина, ширина v -го слоя, f -го кольца (рис. 2).

Рассчитываются составляющие вектора намагниченности для j -го ЭО.

$$M_{vj} = M_j \frac{H_{vj}}{H_j}; \quad M_j = M_j \frac{H_{zj}}{H_j} \quad (5)$$

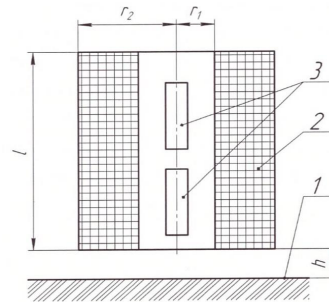


Рис. 1. Упрощенная конструкция импульсного градиентометрического преобразователя

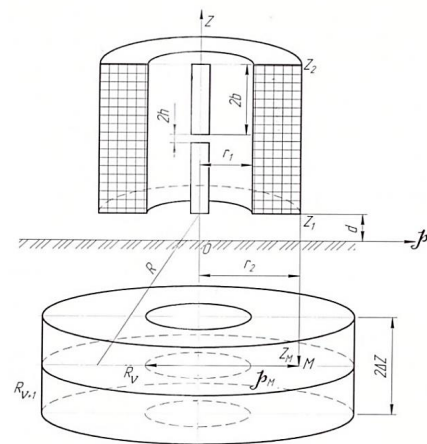


Рис. 2. К расчету выходного сигнала феррозонда

Напряженность магнитного поля в сердечник H_ϕ феррозонда рассчитывается с помощью теоремы о взаимности, которая записывается следующим образом:

$$H_\phi = \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \int_V \bar{H}(\rho) \bar{M}(\rho) dV. \quad (6)$$

В первом приближении формула (5) имеет вид:

$$H_\phi \approx \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \sum_{j=1}^N \bar{H}_j \cdot \bar{M}_j \cdot \Delta V_j, \quad (7)$$

где ΔV_j — объем j -го ЭО;

N — количество ЭО;

μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника.

Считается, что сердечники феррозонда имеют круглое сечение и расположены на оси катушки (рис. 3); магнитное поле имеет осевую симметрию, поэтому переписывается (7) так:

$$H_\phi = \frac{1}{Iw\mu_c S_\phi} \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \bar{H}_{vf} \cdot \bar{M}_{vf} \cdot \Delta V_{vf}. \quad (8)$$

Магнитное поле, создаваемое сердечником феррозонда с обмоткой w , по которой протекает ток I , можно аппроксимировать полем двух разноименных, но одинаковых по численному значению магнитных зарядов.

Напряженность этого поля равна

$$\bar{H} = \frac{Iw\mu_c}{4 \cdot 2b} a^2 \cdot \frac{1}{R^2} \bar{1}_k, \quad (9)$$

где a — радиус сердечника феррозонда;

$2b$ — длина сердечника феррозонда.

Следовательно, в геометрических центрах сечения колец ферромагнитного материала составляющие вектора H будут иметь вид:

$$H_{pvf} = \frac{Iw\mu_c a^2}{8b} \left[\begin{array}{c} \frac{R_{vf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \\ \frac{R_{vf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \end{array} \right];$$

$$H_{zvf} = \frac{Iw\mu_c a^2}{8b} \left[\begin{array}{c} \frac{d + z_{vf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \\ \frac{d + 2b + z_{vf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \end{array} \right]. \quad (10)$$

Таким образом, напряженность магнитного поля, наведенного намагниченной локальной областью, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$H_{pvf} = \frac{a^2}{8bS_\Phi} \sum_{v=1}^T \sum_{f=1}^F \left(\frac{R_{vf} M_{pvf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{R_{vf} M_{pvf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} + \frac{(d + z_{vf}) M_{pvf}}{(d + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} - \frac{(d + 2b + z_{vf}) M_{pvf}}{(d + 2b + Z_{vf})^2 + R_{vf}^2} \right) \Delta V_{vf}. \quad (11)$$

По формуле (11) рассчитывается напряженность магнитного поля во втором полуэлементе феррозонда, только d изменяется на $d' = d + 2b + 2h$, где $2h$ — расстояние между двумя полуэлементами феррозонда (рис. 1).

Выходная напряженность рассчитывается по следующей формуле:

$$U_{m2} = G(H_{\Phi 1} - H_{\Phi 2}), \quad (12)$$

где G — функция преобразования феррозонда;

$H_{\Phi 1}, H_{\Phi 2}$ — напряженность в первом и во втором полуэлементах феррозонда.

Функция преобразования феррозонда представляется следующей формулой [10]:

$$G = \frac{8}{\pi} \omega S w_2 \mu_0 \mu_c, \quad (13)$$

где S — площадь сечения сердечника феррозонда;

ω — угловая частота возбуждения;

w_2 — число витков выходной области феррозонда;

μ_c — относительная магнитная проницаемость сердечника феррозонда.

Величина G для феррозондов, используемых в градиентометрах с размерами сердечников $12 \times 2 \times 0,025$ мм, находится в пределах $2,5 \cdot 10^{-2} \dots 5 \cdot 10^{-2} \frac{B}{A/M}$.

Результаты экспериментов. Для проведения эксперимента использовалась катушка без экрана высотой $Z_k = 35$ мм с внутренним радиусом $\rho_1 =$

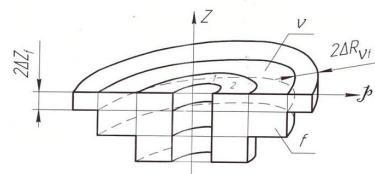


Рис. 3. Разбиение области под катушкой на элементарные объемы

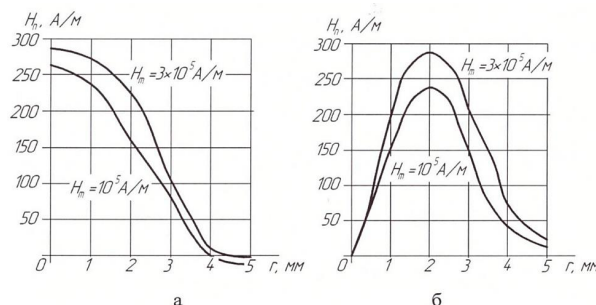


Рис. 4. Зависимость нормальной и касательной составляющих напряженности намагниченной локальной области от координаты r

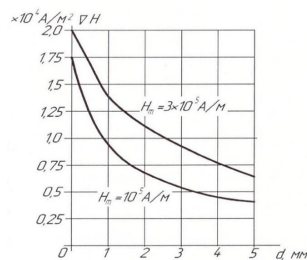


Рис. 5. Зависимость градиента вертикальной составляющей магнитного поля от зазора между датчиком и плоскостью контролируемого изделия (40X)

$= 6$ мм и внешним радиусом $\rho_2 = 12$ мм. Число витков катушки $W = 350$, индуктивность катушки $L = 0,6$ мГн. В статье [5] используется большее количество витков, т.к. имеется различие в материале и сечении проводников. В обмотку катушки подавался импульс тока, который создавал магнитную напряженность поля $3 \cdot 10^5$ А. Длительность импульса считается достаточной для полного намагничивания металла.

На рис. 4 показана зависимость нормальной (рис. 4а) и касательной (рис. 4б) составляющих напряженности поля от координаты r для различных значений амплитуды импульса намагничивающего поля для стали 40X.

Зависимость градиента напряженности магнитного поля от расстояния между датчиком и плоскостью контролируемой детали показана на рис. 5.

Максимальное значение градиента рассчитывалось при различных значениях толщины упрочняемого слоя для стали 20 и 40X, результаты расчета приведены в табл. 1.

Данные, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что имеется функциональная зависимость градиента напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области от коэрцитивной силы и более слабая зависимость градиента

Зависимость градиента магнитного поля намагниченной локальной области от коэрцитивной силы и толщины упрочненного слоя

Материал и его коэрцитивная сила до и после обработки	Толщина упрочненного слоя, мм					
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
	Градиент поля ∇H , А/м ²					
Сталь 20 $H_{C \min} = 450 \text{ А/м}^2$ $H_{C \max} = 560 \text{ А/м}^2$	$2,4 \cdot 10^4$ $3,0 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$ $3,5 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$ $3,9 \cdot 10^4$	$3,4 \cdot 10^4$ $4,2 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$ $4,4 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$ $4,4 \cdot 10^4$
Сталь 65Г $H_{C \min} = 810 \text{ А/м}^2$ $H_{C \max} = 930 \text{ А/м}^2$	$3,6 \cdot 10^4$ $4,1 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$ $4,5 \cdot 10^4$	$4,15 \cdot 10^4$ $4,8 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$	$4,2 \cdot 10^4$ $4,83 \cdot 10^4$
Сталь 30ХГСА $H_{C \min} = 840 \text{ А/м}^2$ $H_{C \max} = 950 \text{ А/м}^2$	$4,4 \cdot 10^4$ $4,97 \cdot 10^4$	$4,7 \cdot 10^4$ $5,3 \cdot 10^4$	$4,9 \cdot 10^4$ $5,5 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^4$ $5,65 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$ $5,8 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^4$ $5,8 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_{C \min} = 1200 \text{ А/м}^2$ $H_{C \max} = 1700 \text{ А/м}^2$	$6,8 \cdot 10^4$ $9,6 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$ $10,2 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$ $10,5 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4$ $10,6 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^4$ $10,8 \cdot 10^4$	$7,8 \cdot 10^4$ $11,0 \cdot 10^4$

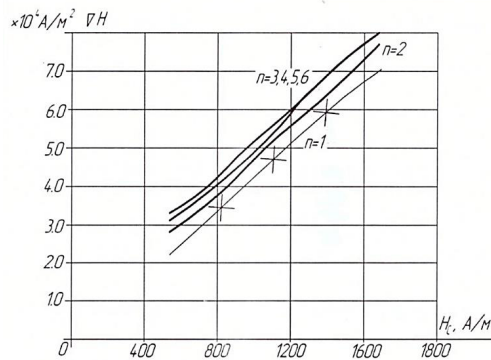


Рис. 6. Зависимость градиента напряженности магнитного поля от коэрцитивной силы ферромагнитного материала и от количества упрочненных слоев (40X)

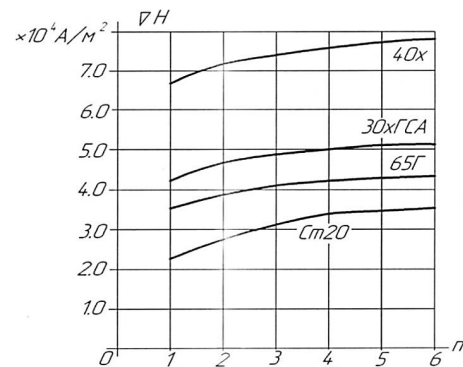


Рис. 7. Зависимость градиента напряженности магнитного поля от количества упрочненных слоев (толщина одного слоя 0,05 мм)

Таблица 2

Зависимость величины градиента напряженности магнитного поля от толщины контролируемой детали

Амплитуда импульса тока	Толщина детали, мм						
	20	15	10	8	6	4	2
	Градиент поля ∇H , А/м ²						
Сталь 20 $H_m = 10^5 \text{ А}$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$2,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^4$	$4,4 \cdot 10^4$
Сталь 20 $H_m = 3 \cdot 10^5 \text{ А}$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$3,5 \cdot 10^4$	$3,7 \cdot 10^4$	$3,9 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_m = 10^5 \text{ А}$	$6,7 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$6,7 \cdot 10^4$	$6,8 \cdot 10^4$	$6,9 \cdot 10^4$	$7,4 \cdot 10^4$	$7,6 \cdot 10^4$
Сталь 40Х $H_m = 3 \cdot 10^5 \text{ А}$	$7,2 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$7,2 \cdot 10^4$	$7,3 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^4$	$8,5 \cdot 10^4$

поля от толщины упрочненного слоя (рис. 6).

На рис. 7 показана зависимость градиента напряженности магнитного поля от количества виброупрочненных слоев. Эта зависимость, кроме того что имеет существенную нелинейность, не обеспечивает сколько-нибудь приемлемый коэффициент преобразования измерительного преобразователя. Поэтому при определении толщины виброупрочненного слоя металла целесообразно дополнительно

применять метод, использующий многочастотное намагничивание ферромагнитного материала.

В табл. 2 приведены данные зависимости величины градиента напряженности магнитного поля от толщины контролируемой детали, на основе которых можно сделать вывод, что градиент вертикальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области при толщине детали до 8 мм сохраняют одни

и те же значения, а при толщине меньше 8 мм — начинают возрастать в 1,4...1,7 раза.

Выводы

1. Установлено, что имеется функциональная зависимость градиента напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области детали от коэрцитивной силы, после обработки материала возрастает коэрцитивная сила и градиент магнитного поля увеличивается в среднем на 25 %.

2. При увеличении толщины упрочненного слоя материала возрастает градиент магнитного поля, значимые изменения наблюдаются при увеличении толщины упрочненного слоя с 0,05 мм до 0,1 мм, градиент поля возрастает в среднем на 15 %.

3. Градиент вертикальной составляющей напряженности магнитного поля рассеяния намагниченной локальной области при толщине детали от 8 мм до 20 мм сохраняет одни и те же значения, а при толщине меньше 8 мм — начинает возрастать в 1,4...1,7 раза.

Библиографический список

1. Толмачев И. И., Осадчих Ю. В. Повышение качества проведения магнитопорошковой дефектоскопии объектов с подповерхностными дефектами // Вестник науки Сибири. 2014. № 2 (12). С. 81–83.
2. Клюев В. В. [и др.]. Неразрушающий контроль и диагностика (НКиД): справ. / под ред. В. В. Клюева. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2005. 656 с. ISBN 5-217-03300-2.
3. Шелихов Г. С. Магнитопорошковая дефектоскопия: моногр. / под ред. В. В. Клюева. Москва: Спектр, 2010. 336 с. ISBN 978-5-904270-29-2.
4. Федоров О. В. Задачи ресурсобеспечения. Москва: КноРус, 2021. 152 с. ISBN 978-5-4365-7822-4.
5. Мирошниченко О. Н., Чурносоев А. П., Яковенко В. В. Магнитный неразрушающий контроль виброупрочненного слоя поверхности стальных изделий // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». 2011. № 19. С. 183–194.
6. Горкунов Э. С. Различные состояния остаточной намагниченности и их устойчивости к внешним воздействиям. К вопросу о «методе магнитной памяти» // Дефектоскопия. 2014. № 11. С. 3–21.

7. Ушаков В. М. Неразрушающий контроль и диагностика горно-шахтного и нефтегазового оборудования. Москва: Горная книга, 2006. 318 с. ISBN 5-91003-001-9.

8. Криворудченко В. Ф., Ахмеджанов Р. А. Современные методы диагностики и контроля деталей и узлов железнодорожного транспорта / под ред. В. Ф. Криворудченко. Москва: Маршрут, 2005. С. 428–431. ISBN 5-89035-187-7.

9. Борзунов С. В., Семенов М. Е., Сельвесюк Н. И. [и др.]. Гистерезисные преобразователи со случайными параметрами // Математическое моделирование. 2019. Т. 31, № 7. С. 109–126. DOI: 10.1134/S0234087919070074.

10. Безкоровый В. С., Яковенко В. В., Швеи С. Н. Способы аппроксимации кривой намагничивания сердечников феррозондов при однополярном импульсном возбуждении // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 5. С. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33.

ТАРАСЕНКО Олег Владимирович, кандидат технических наук, доцент (Россия), декан факультета «Приборостроение электротехнических и биотехнических систем» Луганского государственного университета имени Владимира Даля (ЛГУ им. В. Даля), г. Луганск.

SPIN-код: 2866-8611

AuthorID (РИНЦ): 1197292

Адрес для переписки: kaf-el-mex@yandex.ru

КРЕСЕЛЮК Юрий Владимирович, старший преподаватель кафедры «Электромеханика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

ИВЛЕВ Михаил Николаевич, аспирант кафедры «Электромеханика» ЛГУ им. В. Даля, г. Луганск.

Для цитирования

Тарасенко О. В., Креселюк Ю. В., Ивлев М. Н. Исследование зависимости градиента магнитного поля от параметров упрочненного слоя стали при импульсном магнитном методе неразрушающего контроля // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-77-83.

Статья поступила в редакцию 11.05.2023 г.

© О. В. Тарасенко, Ю. В. Креселюк, М. Н. Ивлев

THE STUDY OF DEPENDENCE OF MAGNETIC FIELD GRADIENT ON PARAMETERS OF HARDENED STEEL LAYER AT PULSE MAGNETIC METHOD OF NONDESTRUCTIVE TESTING

An assessment is made of the influence of the parameters of a controlled part by the magnetic method of non-destructive testing on the gradient of the magnetic field strength of the measuring transducer. A simplified design of a pulsed gradiometric transducer is presented, and its parameters for conducting experiments are indicated. A mathematical model for calculating the output signal of a gradiometer fluxgate used to obtain output data is considered. The dependences of the magnetic field intensity gradient on the distance between the sensor and the plane of the controlled part, on the coercive force and thickness of the hardened layer, as well as on the thickness of the controlled part are studied. Conclusions are drawn based of the experiment performed.

Keywords: magnetic field gradient, intensity, fluxgate, vibration-impact hardening, non-destructive testing, coercive force.

References

1. Tolmachev I. I., Osadchikh Yu. V. Povysheniye kachestva provedeniya magnitoporoshkovoy defektoskopii ob"yektov s podpoverkhnostnyimi defektami [Improving the quality of magnetic particle defectoscopy of objects with subsurface defects] // *Vestnik nauki Sibiri. Vestnik Nauki Sibiri*. 2014. No. 2 (12). P. 81–83. (In Russ.).
2. Klyuyev V. V. [et al.]. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika [Non-destructive testing and diagnostics] / ed. by V. V. Klyuyeva. 3rd ed. revised and additional. Moscow, 2005. 656 p. ISBN 5-217-03300-2. (In Russ.).
3. Shelikhov G. S. Magnitoporoshkovaya defektoskopiya [Magnetic powder flaw detection] / ed. by V. V. Klyuyeva. Moscow, 2010. 336 p. ISBN 978-5-904270-29-2. (In Russ.).
4. Fedorov O. V. Zadachi resursoobespecheniya [Problems of resource supply]. Moscow, 2021. 152 p. ISBN 978-5-4365-7822-4. (In Russ.).
5. Mirosnichenko O. N., Churnosov A. P., Yakovenko V. V. Magnitnyy nerazrushayushchiy kontrol' vibrouprochnennogo sloya poverkhnosti stal'nykh izdeliy [Magnetic non-destructive testing of vibration-hardened surface layer of steel products] // *Vestnik natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «Khar'kovskiy politekhnicheskiiy institut»*. *Bulletin of the National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»*. 2011. No. 19. P. 183–194. (In Russ.).
6. Gorkunov E. S. Razlichnyye sostoyaniya ostatochnoy namagnichennosti i ikh ustoychivosti k vneshnim vozdeystviyam. K voprosu o «metode magnitnoy pamyati» [Various states of residual magnetization and their stability to external influences. On the issue of the «magnetic memory method»] // *Defektoskopiya. Defectoscopy*. 2014. No. 11. P. 3–21. (In Russ.).
7. Ushakov V. M. Nerazrushayushchiy kontrol' i diagnostika gorno-shakhtnogo i neftegazovogo oborudovaniya [Non-destructive testing and diagnostics of mining and oil and gas equipment]. Moscow, 2006. 318 p. ISBN 5-91003-001-9. (In Russ.).
8. Krivorudchenko V. F., Akhmedzhanov R. A. Sovremennyye metody diagnostiki i kontrolya detaley i uzlov zheleznodorozhnogo transporta [Modern methods of diagnostics and control of parts and components of railway transport] / ed. by V. F. Krivorudchenko. Moscow, 2005. P. 428–431. ISBN 5-89035-187-7. (In Russ.).
9. Borzunov S. V., Semenov M. E., Selvesyuk N. I. [et al.]. Gisterezisnyye preobrazovateli so sluchaynymi parametrami [Hysteresis converters with random parameters] // *Matematicheskoye modelirovaniye. Mathematical Modeling*. 2019. Vol. 31, no. 7. P. 109–126. DOI: 10.1134/S0234087919070074. (In Russ.).
10. Bezkorovaynyy V. S., Yakovenko V. V., Shvets S. N. Sposoby approksimatsii krivoy namagnichivaniya serdechnikov ferrozondov pri odnopolyarnom impul'snom vozvuzhdenii [Methods of magnetization curve of ferroprobe cores approximation at unipolar pulse excitation] // *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskoye nauki. News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2021. No. 5. P. 25–33. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-5-25-33. (In Russ.).

TARASENKO Oleg Vladimirovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of Instrumentation of Electrical and Biotechnical Systems

Faculty, Lugansk State University named after Vladimir Dal (LSU named after Vladimir Dal), Lugansk.

SPIN-code: 2866-8611

AuthorID (RSCI): 1197292

Correspondence address: kaf-el-mex@yandex.ru

KRESELYUK Yuriy Vladimirovich, Senior Lecturer of Electromechanics Department, LSU named after Vladimir Dal, Lugansk.

IVLEV Mikhail Nikolayevich, Graduate Student of Electromechanics Department, LSU named after Vladimir Dal, Lugansk.

For citations

Tarassenko O. V., Kreselyuk Yu. V., Ivlev M. N. The study of dependence of magnetic field gradient on parameters of hardened steel layer at pulse magnetic method of nondestructive testing // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 4 (188). P. 77–83. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-77-83.

Received May 11, 2023.

© O. V. Tarassenko, Yu. V. Kreselyuk,
M. N. Ivlev