

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, НТУ "ХПИ"

ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ КАТУШЕК ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В работе предложена модель вихретокового преобразователя с цилиндрическим образцом и измерительной обмоткой. Получены соотношения для определения эквивалентных сопротивлений и построены графики зависимости относительного сопротивления преобразователя от глубины проникновения поля в исследуемое изделие для разных конфигураций катушек вихретокового преобразователя и для разных марок стали.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, цилиндрический образец, сопротивление, глубина проникновения.

Постановка проблемы. Контроль качества поверхностной обработки деталей является одной из важнейших технологических операций, обеспечивающих эксплуатационную надежность. Известные методы контроля качества по микроструктуре требуют предварительного разрушения деталей, поэтому контроль производится выборочно. В связи с этим, в настоящее время все более широкое применение получают методы неразрушающего контроля. Наибольшее распространение получил электромагнитный метод контроля, который характеризуется высокой чувствительностью к изменению физических свойств металлов и сплавов и позволяет полностью автоматизировать процесс контроля. При этом обеспечиваются надежность и высокая производительность контроля. В основе электромагнитного метода контроля материалов и деталей лежит электромагнитная теория поля [1].

Возможность контроля качества термообработки с помощью электромагнитного метода определяется тем, что магнитная проницаемость и удельное электрическое сопротивление сталей существенно зависят от их микроструктуры. Как известно, удельная электрическая проводимость и магнитная проницаемость стали тем меньше, чем выше содержание углерода в ней и чем больше углерода при закалке перешло в твердый раствор [2].

Анализ литературы. В работе [3] рассматривается модель упрочненного слоя изделия в виде полупространства с кусочно-линейным изменением по глубине удельного сопротивления в поверхностном слое. В продолжении [3] предлагаются упрочненные модели упрочненного изделия в виде полупространства с однородным слоем или со слоем линейного изменения удельного сопротивления по глубине [4]. Исследованы особенности применения вихретоковых преобразователей для контроля структурного состояния и абразивной износостойкости конструкционной стали 45Х, закаленной при воздействии непрерывным излучением лазера [5], и

шарикоподшипниковой стали ШХ15, подвергнутой лазерной и объемной закалкам [6]. Рассмотрено влияние циклического нагружения отожженной стали 45 при малоциклового усталости на изменение ее электромагнитных характеристик [7]. В работе [8] изучены магнитные и электрические характеристики закаленных и отпущенных образцов углеродистых сталей. Изучено влияние карбидной фазы на чувствительность вихретокового метода контроля износостойкости высокоуглеродистых сталей, подвергнутых низкотемпературной закалке и отпуску [9].

Цель статьи – создание модели вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев металлических изделий и выбор рациональных размеров катушек данного преобразователя.

Математическая модель вихретокового преобразователя. Приступая к разработке методики, необходимо изучить характеристики контролируемой детали и материала, из которого она изготовлена.

Характер показаний электромагнитных приборов зависит как от химического состава контролируемой детали, так и от параметров магнитного поля и частоты тока питания преобразователей.

Выбор частоты тока имеет большое практическое значение при контроле: чем ниже частота тока, тем глубже проникновение вихревых токов.

Как известно, собственная индуктивность L кольцевого проводника диаметра D (см. рис 1) рассчитывается по формуле [10]:

$$L = \mu_0 \frac{D}{2} \left(\ln \frac{8D}{d} - 2 + \frac{\zeta}{4} \right),$$

где D – диаметр кольца (по осевой линии провода);

d – диаметр поперечного сечения провода;

ζ – величина, значение которой определяется в зависимости от значений

параметра kr , причем $kr = \sqrt{\omega \mu_0 \mu_r / \rho}$;

$\omega = 2\pi f$ – циклическая частота возбуждающего тока;

ρ – удельное электрическое сопротивление вещества;

μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Для определения ζ при $kr < 2$ можно пользоваться формулой [10]:

$$\zeta = 1 - \frac{1}{6}x^4 + \frac{13}{270}x^8 \dots,$$

а при $kr > 5$ – формулой:

$$\zeta = \frac{1}{x} - \frac{3}{64x^3} - \frac{13}{270x^4} \dots,$$

где $x = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \pi f}{\rho}}$.

Активное сопротивление кольцевого витка определяется по формуле:

$$R = 4\rho \frac{D}{d^2}.$$

Для нахождения взаимных индуктивностей рассмотрим случаи коаксиальных круговых контуров одинаковых и неодинаковых диаметров (см. рис. 1 а,б соответственно), которые расположены друг относительно друга на расстоянии y .

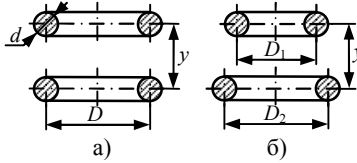


Рис. 1. Коаксиальные круговые контуры с одинаковыми а) и неодинаковыми б) диаметрами

Взаимная индуктивность коаксиальных круговых контуров одного диаметра (см. рис.1, а), расположенных близко друг к другу, рассчитывается по формуле [10]:

$$M_1 = \mu_0 \frac{D}{2} \left[\left(1 + \frac{3}{4} \xi^2 - \frac{15}{64} \xi^4 + \frac{35}{256} \xi^6 + \dots \right) \ln \frac{4}{\xi} - 2 - \frac{1}{4} \xi^2 + \right. \\ \left. + \frac{31}{128} \xi^4 - \frac{247}{1536} \xi^6 + \dots \right],$$

где $\xi = \frac{y}{D}$.

Для расчета взаимной индуктивности коаксиальных круговых контуров с неодинаковыми диаметрами (см. рис. 1, б) воспользуемся формулой, представленной в виде бесконечного ряда [10]:

$$M_2 = \frac{\mu_0 \pi \sqrt{D_1 D_2}}{\sqrt{2(1+q)}} q^{3/4} \left[1 + \frac{1}{4} q^2 + \frac{9}{64} q^4 + \dots + A_n q^{2n} + \dots + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} q + \frac{3}{16} q^3 + \dots + \frac{2n+1}{2(n+1)} A_n q^{2n+1} + \dots \right],$$

где $A_n = \left[\frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \dots 2n} \right]^2$; $q = k_2 = \frac{1-k_1'}{1+k_1'}$; $k_1'^2 = 1 - k_1^2$;

k_2 – модуль полных эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода K_2 и E_2 ;

$$k_1 = \frac{1-k'}{1+k'}; k'^2 = 1 - k^2; k^2 = \frac{4D_1 D_2}{(D_1 + D_2)^2 + 4y^2};$$

k_1 – модуль полных эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода K_1 и E_1 ;

k – модуль полных эллиптических интегралов 1-го и 2-го рода K и E .

Для выбора значения частоты электромагнитного поля зададимся диаметром сечения витка эквивалентной трубки вихревого тока, равным глубине проникновения поля δ , тогда

$$f = \frac{\rho}{2\pi\mu_0\mu_r\delta^2}. \quad (14)$$

Для нашего случая, плотность тока во внутренней части цилиндрического образца диаметром $D_2 - \delta$ принимается равной нулю, тогда рассматриваемый сплошной стержень можно заменить полым цилиндром с внешним диаметром $D_2 + \delta$ и внутренним диаметром $D_2 - \delta$. При этом эквивалентный ему контур будет состоять из последовательно включенных L_2 и R_2 . Вся система, состоящая из катушки возбуждения и находящегося в ней стержня, может быть представлена эквивалентной схемой связанных контуров (см. рис. 2).

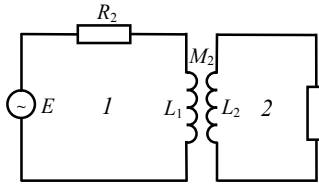


Рис. 2. Схема взаимосвязанных контуров

Эквивалентное сопротивление контура 1 при наличии связанного с ним контура 2 можно определить по формуле [11]:

$$Z_{\text{эkv}} = R_1 + \frac{\omega^2 M_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} R_2 + j \left(\omega L_1 - \frac{\omega^2 M_2^2}{R_2^2 + (\omega L_2)^2} \omega L_2 \right),$$

где R_1 – активное сопротивление контура 1: $R_1 = 4\rho W_1 \frac{D_1}{d^2}$;

W_1 – количество витков вихретокового преобразователя (ВТП);

L_1 – индуктивность контура 1, которая рассчитывается по формуле:

$$L_1 = \mu_0 W_1 \frac{D_1}{2} \left(\ln \frac{8D_1}{d} - 2 + \frac{\zeta}{4} \right) + M_1;$$

R_2 – активное сопротивление контура 2 [11]:

$$R_2 = \frac{\pi(D_2 + \delta)\sqrt{\pi\mu_0\mu_r\rho f}}{l},$$

l – длина образца;

M_2 – взаимная индуктивность между первым и вторым контуром;

L_2 – индуктивность контура 2, которая рассчитывается по формуле:

$$L_2 = \mu_0 \frac{l}{\delta} \frac{D_2}{2} \left(\ln \frac{8D_2}{\delta} - 2 + \frac{\zeta}{4} \right) + M_1.$$

Рассмотрим три модели ВТП с цилиндрическим образцом и измерительными обмотками в виде горизонтально расположенных витков, вертикально расположенных витков и в виде катушки квадратного сечения, обобщенно представленные на рис. 3. Образец представляет собой соленоид, разбитый на элементарные витки, диаметр сечения которых равен δ .

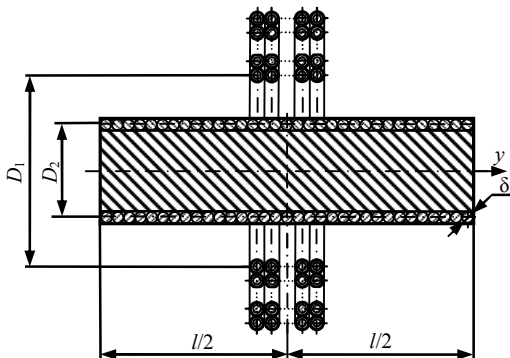


Рис. 3. ВТП с цилиндрическим образцом и измерительной обмоткой различной конфигурации

Для того, чтобы произвести расчет модели ВТП, зададим ее параметры. Параметры обмотки: внешний диаметр витка $D_1 + d = 14$ мм; диаметр провода $d = 0,1$ мм (с учетом изоляции диаметр провода $d = 0,12$ мм); материал витка – медь, $\rho = 0,17 \cdot 10^{-7}$ Ом·м; (количество витков обмотки ВТП составляло 9, 18 и 81 виток для соответствующей конфигурации катушки). Параметры образца: внешний диаметр образца $D_2 + \delta = 10$ мм; длина образца $l = 50$ мм. В расчетах будем использовать образцы, изготовленные из стали Ст. 45 с характеристиками $\mu_r = 80$; $\rho = 2,13 \cdot 10^{-7}$ Ом·м и стали X18H10T с характеристиками $\mu_r = 1,5$; $\rho = 7,14 \cdot 10^{-7}$ Ом·м. Расчет значений $Z_{\text{экв}}$ проведем для глубин проникновения поля $\delta = 0,1$ мм; $\delta = 0,2$ мм; $\delta = 0,3$ мм; $\delta = 0,4$ мм и $\delta = 0,5$ мм.

В табл. приведены расчетные значения Z^* для различных глубин проникновения поля и различных конфигураций катушек, причем Z^* определяется из соотношения:

$$Z^* = \frac{Z_{\text{экв}}}{Z_1}, \text{ где } Z_1 = R_1 + j\omega L_1.$$

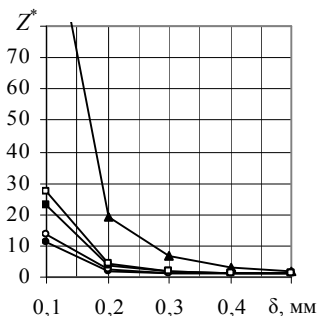
На рис. 4 представлены графики зависимости Z^* от δ для разных конфигураций измерительных катушек ВТП и двух марок стали.

Выводы. Проанализировав рассмотренные выше модели ВТП, можно сделать вывод, что ВТП с обмоткой в виде горизонтально расположенных витков целесообразно использовать для структуроскопии, а ВТП с обмоткой в виде вертикально расположенных витков – для дефектоскопии.

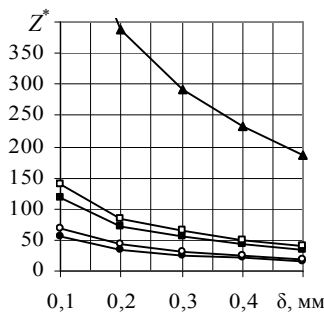
Таблица

Значение Z^* для разных глубин проникновения и обмоток ВТП

Марка материала	δ , мм	Z^* гориз.	Z^* вертик.	Z^* (9×2)	Z^* (2×9)	Z^* (9×9)
Сталь Ст. 45	0,1	10,97105	13,56105	22,80435	27,26351	122,2989
	0,2	1,870738	2,325251	3,672947	4,372516	19,32901
	0,3	1,157745	1,232652	1,586365	1,773946	6,723213
	0,4	1,038855	1,058244	1,158156	1,213111	3,320475
	0,5	1,014129	1,021017	1,05709	1,080283	2,078742
Сталь Х18Н10Т	0,1	56,71799	69,36175	118,159	139,7236	627,1642
	0,2	34,53157	42,02478	71,57546	85,22216	386,5336
	0,3	25,8938	31,52017	54,54195	64,21084	291,8374
	0,4	20,40772	24,95136	42,83989	49,95516	232,0466
	0,5	16,31853	20,03536	34,35472	40,87616	186,3579



а)



б)

Рис. 4. Графики зависимости Z^* от глубины проникновения для стали Ст.45 а) и стали Х18Н10Т б) для разных конфигураций катушек ВТП: ● – 9 горизонтальных витков; ○ – 9 вертикальных витков; ■ – 9×2; □ – 2×9; ▲ – 9×9

Для более качественного контроля поверхности упрочненных деталей необходимо усовершенствовать ВТП, т. е. для нашего случая возможно использование ВТП с обмоткой в виде катушки квадратного сечения.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с. 2. Горкунов Э.С., Задворкин С.М., Смирнов С.В. и др. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей при одноосном растяжении / Тезисы докладов 5-й Международной конференции "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности". Москва, 16 – 19 мая 2006 г. – М.: Машиностроение, 2006. – С. 63. 3. Митрофанов В.А., Грязев С.Г. Теоретические основы трехпараметрового контроля упрочненного слоя асимметричным ЭП преобразователем на квазипостоянном токе. Ч. 1. Модель HL // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 73 – 81. 4. Митрофанов В.А., Грязев С.Г. Теоретические основы трехпараметрового контроля упрочненного слоя асимметричным ЭП преобразователем на квазипостоянном токе. Ч. 2. Модели Н и L // Дефектоскопия. – 2003. – № 12. – С. 73 – 83.

5. Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х. и др. Особенности электромагнитных методов контроля износостойкости среднеуглеродистой конструкционной стали, подвергнутой лазерной или объемной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 28 – 39. 6. Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х. и др. Вихретоковый и коэрцитиметрический контроль абразивной износостойкости шарикоподшипниковой стали ШХ15, подвергнутой лазерной и объемной термическим обработкам // Дефектоскопия. – 2006. – № 10. – С.3 –16. 7. Горкунов Э.С., Саврай Р.А., Макаров А.В. и др. Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожженной среднеуглеродистой стали // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 24 – 30. 8. Коган Л.Х., Ничитурук А.П., Гаврилова Л.Д. Влияние содержания углерода на магнитные, электрические свойства термообработанных углеродистых сталей и возможности контроля качества отпуска изделий из них вихретоковым методом // Дефектоскопия. – 2006. – № 9. – С. 72 – 90. 9. Макаров А.В., Горкунов Э.С., Коган Л.Х. и др. Коэрцитиметрический и вихретоковый контроль абразивной износостойкости закаленных и отпущенных заэвтектоидных углеродистых сталей. I. Стали, подвергнутые стандартной низкотемпературной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2007. – № 5. – С. 3 – 11. 10. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 368 с. 11. Физические и физико-химические методы контроля состава и свойств вещества. Метод вихревых токов. Под общей редакцией академика АН Киргизской ССР Н.Н. Шуμιловского. – М.-Л.: "Энергия", 1966. – 176 с.

УДК 620.179.14

Вибір раціональних розмірів котушок вихорострумowego перетворювача для контролю металевих виробів / Горкунов Б.М., Тюпа І.В., Тищенко А.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №. 49. – С. 26 – 32.

У роботі запропоновано модель вихорострумowego перетворювача з циліндричним зразком і вимірювальною обмоткою різної конфігурації. Отримано співвідношення для визначення еквівалентного опору перетворювача і побудовано графіки залежності відносного опору від глибини проникнення поля в досліджуваний виріб для різних конфігурацій котушок вихорострумowego перетворювача і для різних марок сталі. Іл.: 4. Табл.: 1. Бібліогр.: 11 назв.

Ключові слова: вихорострумовой перетворювач, циліндричний зразок, опір, глибина проникнення.

UDK 620.179.14

Choice of the rational sizes of coils eddy current converter for the control of metal products / Gorkunov B.M., Tyupa I.V., Tichshenko A.A. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2006. – № 49. – P. 26 – 32.

In work the model of eddy current converter with the cylindrical sample and a measuring coil of a various configuration is offered. Expressions for definition of equivalent resistance are received and diagrams of dependence of relative resistance from depth of penetration of a field in the probed sample for different configurations of coils eddy current converter and for different marks of steel are constructed. Figs: 4. Tabl.: 1. Refs: 11 titles.

Key words: eddy current converter, cylindrical sample, resistance, depth of penetration.

Поступила в редакцію 10.10.2008