

Маршрут, 2006. – 350 с. **29.** Г.В. Бидя, А.П. Ничипурук. Коэрцитиметрия в неразрушающем контроле // Дефектоскопия. – 2000. – № 10. – С. 3-28. **30.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль глубины и твердости поверхностно упрочненных слоев на изделиях (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 5. – С. 10-28. **31.** Г.В. Бидя. Магнитный контроль качества закаленных и отпущенных деталей из углеродистых и низколегированных сталей (обзор) // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 15-27. **32.** Бакунов А.С., Мужичкий В.Ф., Попов Б.Е. Контроль механических свойств алюминиевых сплавов электромагнитным методом // Дефектоскопия. – 1995. – № 2. – С. 61-67. **33.** А.В. Макаров, Э.С. Горкунов, Л.Х. Коган, Ю.М. Колобылин, Л.Г. Коршунов, А.Л. Осинцева. Особенности электромагнитных методов контроля износостойкости среднеуглеродистой конструкционной стали, подвергнутой лазерной или объемной закалке и отпуску // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 28-39. **34.** В.С. Чернов. Контроль термообработки литейных алюминиевых сплавов по электропроводности на Заволжском моторном заводе // В мире НК. – 2009. – № 1. С. 32-34. **35.** А.Н. Хайлов, Т.Н. Пенькова, А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, Н.Д. Преснов, В.И. Агальцов. Неразрушающий контроль механических характеристик алюминиевых сплавов по удельной электрической проводимости // Дефектоскопия. – 2006. – № 7. – С. 3-14. **36.** Л.Х. Коган, А.П. Ничипурук, Л.Д. Гаврилова. 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. **37.** А.С. Бакунов, В.Ф. Мужичкий, С.Е. Шубочкин. Структуроскоп вихретоковый ВЭ-26НП // Дефектоскопия. – 2003. – № 11. – С. 67-72. **38.** Э.С. Горкунов, Р.А. Саврай, А.В. Макаров, Л.Х. Коган, С.А. Роговая. Применение вихретокового метода для оценки накопленной пластической деформации и остаточных механических свойств после циклического нагружения отожженной среднеуглеродистой стали // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 24-30. **39.** Сандаловский В.А., Уваров А.И., Терещенко Н.А. Влияние пластической деформации и отжига армо-железа на сигнал накладного вихретокового преобразователя // Дефектоскопия. – 1999. – № 3. – С. 61-67. **40.** Терентьев В.Ф. Усталостная прочность металлов и сплавов. – М.: Интермет Инжиниринг. – 2002. – 288 с. **41.** В.И. Боченин, В.П. Кузнецов. Радиоизотопный способ контроля глубины поверхностного наклепа нефтегазовых трубопроводов // Дефектоскопия. – 2004. – № 12. С. 26-48. **42.** Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.3: Ультразвуковой контроль / И.Н. Ермолов, Ю.В. Ланге. – М.: Машиностроение, 2004. – 864 с.: ил. **43.** Ермолов И.К., Алешин Н.П., Потапов А.И. Акустические методы контроля – М.: Высш. школа, 1991. **44.** В.Г. Бадалян. Оценка результатов контроля по акустическим изображениям // Дефектоскопия. – 2007. – № 4. – С. 39-58.

УДК 620.179

**О.Л. БАГМЕТ**, к-т техн. наук, доц. НТУ "ХПИ",  
**С.Г. ЛЬВОВ**, к-т техн. наук, доц. НТУ "ХПИ"

### **БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РАДИУСА ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ ПЕРЕМЕННО-ЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ**

Показано можливість використання змінно-частотного електромагнітного методу для вимірювання радіусу немагнітного провідного циліндричного виробу. Побудовано градуювальні характеристики трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП) при вимірюванні радіусу циліндричного виробу з нержавіючої сталі та алюмінію. Визначено чутливість перетворювача до зміни радіусу.

Possibility of the using non-contact variable-frequency electromagnetic method measuring of cylindrical nonmagnetic article radius is offered. The calibration characteristics of the transformations electromagnetic converter (TEMC) for measurements of radius aluminum and steels cylindrical articles is obtained. Sensitivity of the converter is calculated.

Для определения радиуса цилиндрического проводящего немагнитного изделия может быть применен электромагнитный переменного-частотный метод, имеющий преимущества в бесконтактности и простоте своей реализации.

К настоящему времени в литературе рассмотрены многопараметровые электромагнитные методы совместного измерения параметров цилиндрического изделия [1–3], однако указанный однопараметровый переменного-частотный метод благодаря своей простоте и надежности может использоваться при разбраковке прутков из немагнитных сталей и слабомагнитных материалов, в тех случаях, где нужна калибровка изделий по радиусу (диаметру), например, при отборе прутков для станков с ЧПУ.

На рис.1 показана схема включения трансформаторного электромагнитного преобразователя с исследуемым цилиндрическим изделием. Схема содержит генератор Г синусоидальных сигналов, частотомер Ч, амперметр А, измеряющий намагничивающий ток I до частот 1500 Гц. Ток более высокой частоты определяется вольтметром В1 по падению напряжений  $U_{R_0}$  на образцовом сопротивлении  $R_0$ . При этом  $I = U_{R_0} / R_0$ .

Схема включает в себя рабочий РП и два опорных ОП и ОП1 трансформаторных электромагнитных проходных преобразователя (ТЭМП). В РП помещается исследуемое изделие И. Фазометр Ф регистрирует фазовый угол  $\varphi_{вн}$  между вносимой ЭДС  $E_{вн}$  и ЭДС  $E_0$ , которая возникает на концах измерительной обмотки РП при отсутствии в нём изделия. Намагничивающие обмотки РП, ОП и ОП1 включены последовательно–согласно, а измерительные обмотки РП и ОП соединены последовательно–встречно. РП,

ОП и ОП1 – идентичные по своим параметрам преобразователи, поэтому РП без изделия, а также ОП и ОП1 во вторичной (измерительной) обмотке имеют такую же ЭДС  $E_0$ .

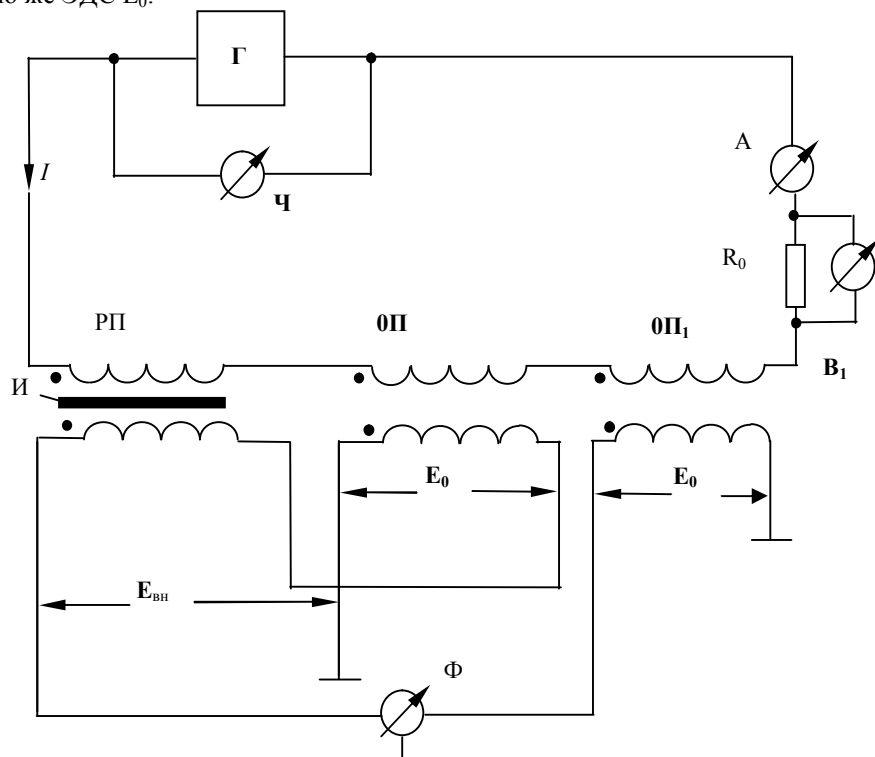


Рис. 1. Схема включения ТЕМП с цилиндрическим изделием

Схема настраивается следующим образом. Во избежание нагрева изделия вихревыми токами напряженность  $H_0$  магнитного поля внутри преобразователя должна быть небольшой (порядка 50 – 200 А/м). При этом, эффективное значение намагничивающего тока  $I$  должно быть порядка 100 – 150 мА, ток определяется из формулы

$$I_{эф} = \frac{H_0 l_n}{\sqrt{2} \cdot W_1 C}, \quad (1)$$

где  $W_1$  - число витков намагничивающей обмотки,  $C$  – коэффициент, зависящий от отношения длины преобразователя к диаметру и при  $l_n/d = 10$  равный 0,95;  $l_n$  – длина намагничивающей обмотки преобразователя.

Суть переменного-частотного метода состоит в поддержании постоянным значения фазового угла  $\varphi_{вн} = \varphi_{вн1} = const$  при изменении радиуса изделия путем изменения частоты  $f$  магнитного поля.  $\varphi_{вн}$  – фазовый угол вносимой ЭДС  $E_{вн}$  ТЭМП, обусловленной магнитным потоком в цилиндрическом изделии при внесении его в преобразователь. Параметр  $\varphi_{вн1}$  характеризует рабочую точку  $x_1$  на универсальной функции преобразования  $\varphi_{вн} = f(x)$ , здесь  $x$  – обобщенный электромагнитный параметр, характеризующий степень затухания магнитного поля в изделии, определяемый из соотношения [4]

$$x = a \sqrt{2\pi f \mu_0 \mu_r / \rho}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Таким образом, достижение условия  $\varphi_{вн} = \varphi_{вн1} = const$  при изменении радиуса изделия сводится к поддержанию с помощью изменения частоты  $f$  равенства  $x = x_1 = const$ . В этом случае для немагнитного изделия ( $\mu_r = 1$ ) при известной марке материала, а, следовательно, известном значении  $\rho$ , существует однозначная зависимость между радиусом изделия и частотой  $f$  намагничивающего тока.

$$a = \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi f \mu_0}}. \quad (3)$$

Данная схема не требует компенсации эффекта воздушного зазора, в связи с тем что в ней используется в качестве параметров выходного сигнала вносимые значение ЭДС и ее фазы, поэтому отпадает необходимость в измерении с помощью вольтметра ЭДС на измерительных обмотках преобразователей РП, ОП и ОП1.

Рабочую точку  $x = x_1 = 4$  выбираем в оптимальном по погрешности и чувствительности режиме работы  $1,5 \leq x \leq 4,5$  преобразователя, что соответствует максимальной крутизне характеристики  $\varphi_{вн} = f(x)$ . Постоянство значения  $x_1$  достигается постоянством фазового угла  $\varphi_{вн} = 24,43$  град [4].

Перепишем зависимость (3) в виде

$$a = \frac{K_1}{\sqrt{f}}, \quad (4)$$

где  $K_1$  - постоянный коэффициент для выбранной марки материала и значения рабочей точки  $x_1$ ;

$$K_1 = \frac{x \sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi \mu_0}}. \quad (5)$$

Оценим значения коэффициента  $K_1$  для исследуемых изделий из нержавеющей стали 1X18Н10Г и алюминия. Удельная электропроводность этих материалов:  $\rho_{\text{стали}} = 72,8 \cdot 10^{-8}$  Ом м;  $\rho_{\text{алюм}} = 2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом м.

$$K_{1\text{стали}} = \frac{4\sqrt{72,8 \cdot 10^{-8}}}{\sqrt{6,28 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} = 1,215; \quad K_{1\text{алюм}} = \frac{4\sqrt{2,6 \cdot 10^{-8}}}{\sqrt{6,28 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}}} = 0,229.$$

Таким образом, функция преобразования при измерении радиуса стального изделия имеет вид

$$a = \frac{1,215}{\sqrt{f}}, \quad (6)$$

а для алюминиевого изделия

$$a = \frac{0,229}{\sqrt{f}}. \quad (7)$$

Градуировочные характеристики ТЭМП со стальным и алюминиевым изделиями, построенные при использовании зависимостей (6) и (7), приведены на рис.2.

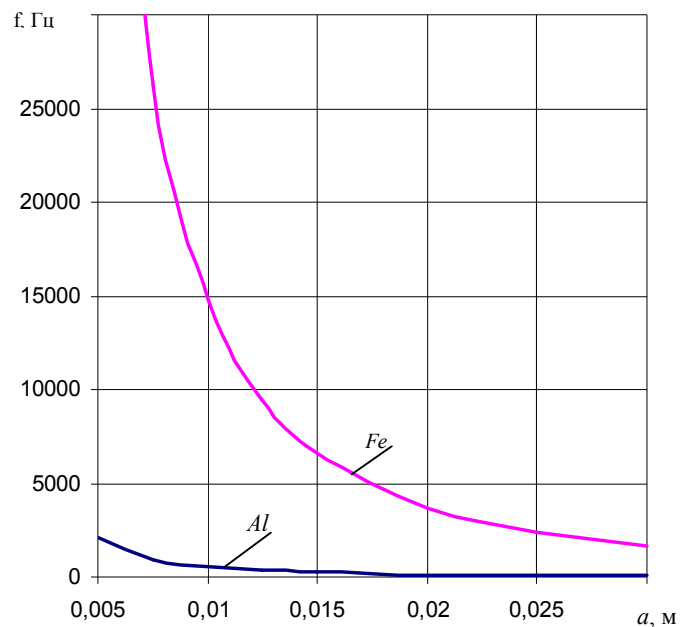


Рис.2. Градуировочные характеристики ТЭМП с алюминиевым и стальным изделиями

Как видно из рис.2, несмотря на нелинейность, крутизна градуировочной характеристики ТЭМП для изделия из стали довольно велика, что говорит о высокой чувствительности преобразователя к изменению радиуса изделия.

На основании расчетов таблицы на рис. 3. построены зависимости абсолютной чувствительности  $S$  ТЭМП к изменению радиуса в Гц/мкм для алюминиевого и стального изделия (соответственно кривые Al и Fe), рассчитанные на основании градуировочных характеристик ТЭМП. Для расчета чувствительности использовалось соотношение

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta a} = \frac{f_{i+1} - f_i}{a_{i+1} - a_i},$$

где  $f_{i+1}$  и  $f_i$  - соответственно предыдущее и последующее значения частот, полученные по градуировочной характеристике ТЭМП;  $a_{i+1}$  и  $a_i$  - предыдущее и последующее значение радиуса.

$S$ , Гц/мкм

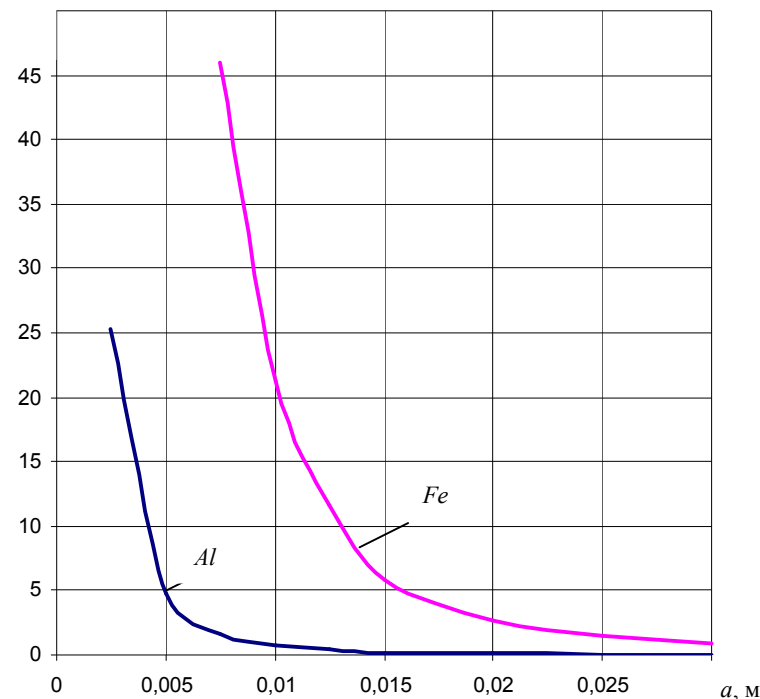


Рис.3. Зависимость чувствительности ТЭМП от изменения радиуса изделий из алюминия и нержавеющей стали

Таблица

$a, \text{ м}$	$S_{Al}, \text{ Гц/мкм}$	$S_{Fe}, \text{ Гц/мкм}$
0,0025	25,31	708,83
0,0050	4,69	131,26
0,0075	1,64	45,94
0,0100	0,76	21,26
0,0125	0,41	11,55
0,0150	0,21	5,74
0,0200	0,10	2,66
0,0250	0,05	1,44
0,0300	0,03	0,87

На основании расчета чувствительностей (см. табл.) можно выбрать оптимальные режимы работы преобразователя. Для изделий из нержавеющей стали наиболее предпочтительным является диапазон изменения радиусов изделия от 2,5 мм до 25 мм. При этом чувствительность составляет  $S_{Fe}=708,83$  Гц/мкм и  $S_{Fe} = 1,44$  Гц/мкм, соответственно в начале и конце диапазона. Изделия из алюминия можно измерять до значений радиуса  $a$ , равных примерно 10 мм. Чувствительность ТЭМП для этого значения радиуса алюминиевого изделия составляет  $S_{Al} = 0,76$  Гц/мкм. При больших значениях радиусов чувствительность ТЭМП падает.

Одним из способов повышения чувствительности, а, следовательно, расширения диапазона измерения преобразователя, может быть увеличение значения рабочей точки  $x$ . Однако при этом уменьшается глубина проникновения магнитного поля в изделие. Этот вопрос подлежит дальнейшему исследованию, так как и вопросы точности измерения радиуса изделий с помощью переменного-частотного электромагнитного метода.

Таким образом, с помощью ТЭМП измеряют переменного-частотным методом радиус цилиндрического изделия для конкретной марки немагнитного или слабомагнитного материала с известным значением удельной электропроводности.

**Список литературы:** 1. Себко В.П., Сиренко Н.Н., Горкунов Б.М. Определение магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. - №2. –С.39-43. 2. Сандовский В.А., Носальская Н.И. Исследование возможности разбраковки прутковой стали по маркам методом вихревых токов в двухпараметровом варианте // Дефектоскопия. – 1983. - № 6. - С.30-34. 3. Себко В.П., Пантелеев М.С. Бесконтактное измерение диаметра и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий // Заводская лаборатория. – 1987. - Т.53. - №9. -С.48-51. 4. Багмет О.Л. К теории электромагнитного преобразователя температуры. Сборник научных трудов ХГПУ «Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье». – Вып.7 – Ч.3 – Харьков. – 1999. – С.86-88.

**К.Ю. БЕЗИМЯННА**, інж. ІПМ НАН України,  
**А.М. КОЛЕСНИКОВ**, головний технолог ІПМ НАН України,  
**К.А. КОМАРОВ**, наук. співроб. ІПМ НАН України,  
**О.В. ТАЛЬКО**, мол. наук. співроб. ІПМ НАН України

### ДОСЛІДЖЕННЯ СПОТВОРЕННЯ АКУСТИЧНОГО ПОЛЯ ПОБЛИЗУ ДВОВИМІРНОГО ДЕФЕКТУ

В работе приведены результаты экспериментальных исследований по выявлению закономерностей формирования акустического поля малой интенсивности вблизи двумерного дефекта. Показана возможность использования нелинейных эффектов акустического поля малой интенсивности для контроля по качеству контактов порошковых материалов.

In the article results of experimental researches of detection of low of formation of an acoustic field of small intensity near to two-dimensional defect are resulted. Possibility of use of nonlinear effects of an acoustic field of small intensity for the control on quality of contacts of powder materials

**Вступ.** Контактотворення – один із головних процесів, притаманних технології отримання порошкових матеріалів [1]. Створення досконалих контактів і контроль за їхньою якістю є традиційною проблемою порошкової металургії [2]. Для контролю процесу контактотворення використовують різні методи, у тому числі й ультразвукові, але кожен з них має суттєві недоліки [3-5]. Тому обґрунтування та розробка нових методів актуальна.

Маловивченим напрямком вирішення цієї проблеми є використання нелінійних ефектів акустичного поля, обумовлених структурною неоднорідністю матеріалу [6]. Традиційні методи вимірювання нелінійних ефектів в акустичних полях [7] далеко не завжди придатні для цих цілей, тому що в них застосовують високий рівень механічних напружень, які можуть викликати розвинення дефекту. Останнім часом з'явилися роботи [9-10], у яких показана перспективність використання нетрадиційних методів нелінійної акустодіагностики для вирішення задач матеріалознавства.

Постановка задачі. Нелінійність у результаті структурної неоднорідності матеріалу може проявлятися навіть в акустичних полях малої інтенсивності [11]. Характерним елементом недосконалих контактів у матеріалах, отримуваних методами порошкової металургії, є двовимірна пора [4]. Виявлення закономірностей спотворення акустичного поля такою порою дозволить обґрунтувати діагностичні параметри контролю її характеристик. Всебічне дослідження акустичного поля поблизу такої поодинокі пори у порошковому матеріалі неможливо з-за розподілу недосконалих контактів в об'ємі матеріалу. Моделлю двовимірного дефекту порошкових матеріалів може бути тріщина від утомленості. Тому метою цієї роботи було дослідження закономірностей формування акустичного поля малих