

любой точке поверхности ОК будет иметь вид:

$$U(R) = \frac{\rho}{2\pi K_0} \int_{-a}^a \int_{-b}^b \frac{\sin\left[k\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right] - 1 - \cos\left[k\sqrt{(x-R)^2 + y^2}\right]}{\sqrt{(x-R)^2 + y^2}} dy dx \quad (2)$$

где  $\rho$  – плотность материала ОК;  $K_0$  – модуль сжимаемости;  $k$  – волновое число;  $R$  – расстояние до произвольной точки поверхности.

Для примера, на рис. 4 показан график зависимости смещения  $U(R)$  в ОК для электрода размером 20x10 мм, частота возбуждения ультразвуковых колебаний  $f=2,5$  МГц, ОК – стальная пластина прямоугольной формы.

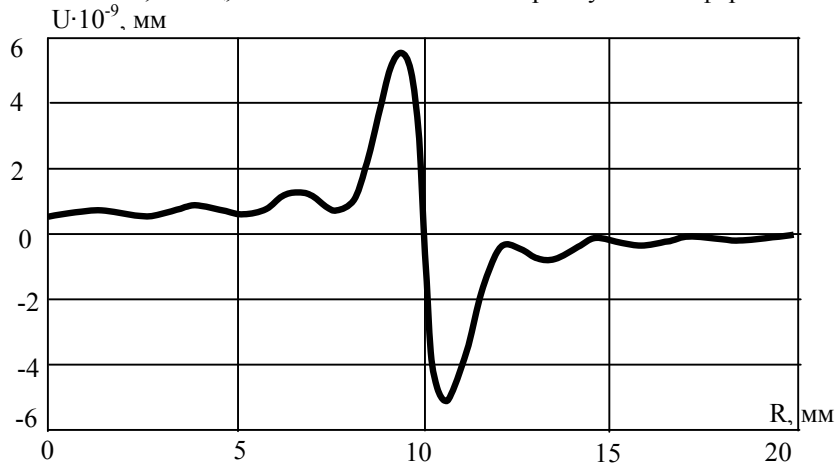


Рис. 4. Смещение упругой волны в поверхности ОК

**Выводы.** Из графика видно, что смещение акустической волны в центре пластины незначительно, максимальная амплитуда смещения  $U$  наблюдается вблизи границы пластины  $R=10$  мм и составляет порядка  $6 \cdot 10^{-9}$  мм и быстро затухает практически до нулевого значения на расстоянии  $R=20$  мм. Данный расчетный результат хорошо согласуется с физическими представлениями о процессе возбуждения ультразвуковых колебаний и экспериментальными данными.

**Список литературы:** 1. 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. 2. Ю.Б. Дробот, А.И. Кондратьев, В.А. Луговой. Возбуждение коротких упругих импульсов емкостным методом // Дефектоскопия. – 1983. - №3. - с. 35-37. 3. Г.М. Сучков, Л.В. Глебова. Дослідження факторів, які впливають на збудження акустичних імпульсів емнісним методом // Вісник НТУ «ХПІ». – 2008. – №48. – с. 116-123. 4. Уравнения математической физики. А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. М.: Наука, 1972. 736 с.

УДК 620.179.14

Ю.В. ХОМЯК, асп., НТУ «ХПИ»

Г.М. СУЧКОВ, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

## РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ОРТОГОНАЛЬНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Розроблено розрахункову модель для оцінки взаємодії вихорострумowego перетворювача з об'єктом, який має поверхневу тріщину. Наведено співвідношення для розрахунку залежностей сигналів вихорострумowego перетворювача від взаємного розташування його обмоток і поверхневої тріщини сталевго зразка. Були проведені якісні порівняння результатів розрахунків з використанням даної моделі і експериментальних даних.

The numerical model of interaction of eddy-current probe with an object that has a surface crack is developed. It is shown formulas for calculating the eddy-current probe signal. The comparison of calculation and experiment is performed.

**Введение.** Важное место в решении задач неразрушающего контроля занимают вихретоковые методы [1-3], обладающие существенными преимуществами по сравнению с другими. С целью создания новых современных приборов, реализующих вихретоковый метод, необходимо изучение его особенностей. Глубокое исследование вихретокового метода возможно выполнить только с помощью его математической модели.

Определение зависимостей сигналов вихретокового преобразователя (ВТП) от параметров дефектов сплошности является одной из важных задач дефектоскопии. Для оценки взаимодействия ВТП с объектом, который имеет поверхностную трещину существуют расчетные модели и методы [4-8]. Известные модели имеют сложный вычислительный аппарат как при аналитических (если возможно), так и численных расчетах.

Целью данной работы является разработка упрощенной математической модели взаимодействия ВТП с ферромагнитным образцом, содержащим трещину.

**Основная часть.** В работе [9] проведен теоритический анализ работы накладного трансформаторного ВТП и показано соотношение для выходного сигнала измерительной обмотки:

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \left( j\omega M_{13} + \omega^2 \frac{M_{12}M_{23}}{R_2 + j\omega L_2} \right), \quad (1)$$

где  $U_3$  – сигнал измерительной обмотки;  $I_1$  – ток возбуждающей обмотки;  $\omega$  – циклическая частота;  $R_2$ ,  $L_2$  – эквивалентные электрические параметры исследуемого образца с трещиной;  $M_{13}$  – взаимная индуктивность между возбуждающей и измерительной обмотками;  $M_{12}$  – взаимная индуктивность

между возбуждающей обмоткой и ОК;  $M_{23}$  – взаимная индуктивность между измерительной обмоткой и ОК. Член  $j\omega M_{13}$  не зависит от свойств ОК, а является лишь характеристикой преобразователя. Если использовать конструкцию ВТП представленную на рис. 1, то можно считать  $M_{13} = 0$ .

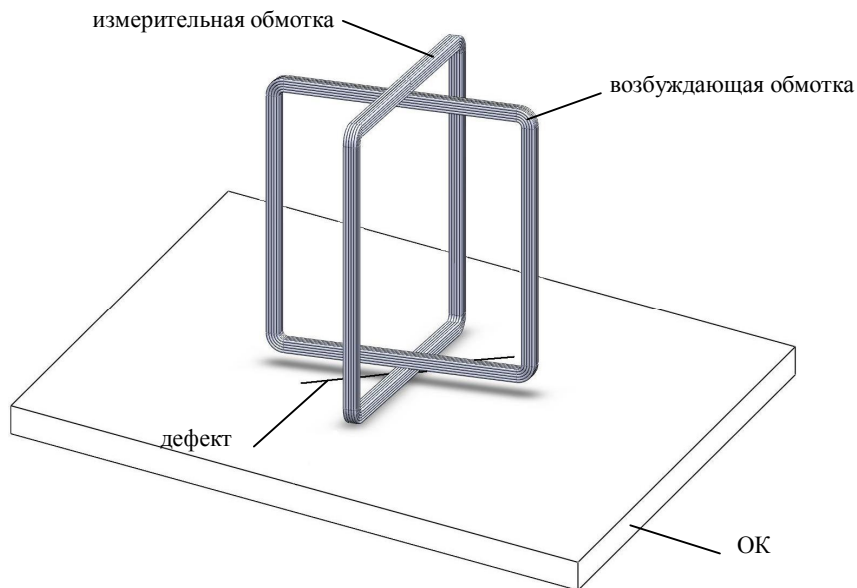


Рис. 1. Конструкция вихрекового преобразователя с ортогональными обмотками

Тогда выражение (1) примет вид

$$\dot{U}_3 = \dot{I}_1 \omega^2 \frac{M_{12} M_{23}}{R_2 + j\omega L_2}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что выходное напряжение вихрекового преобразователя является функцией взаимноиндуктивностей его обмоток с ОК:

$$\dot{U}_3 = f(M_{12} \cdot M_{23}). \quad (3)$$

В работах [4, 10, 11] показана возможность рассмотрения трещины, как системы линейных токов, совмещенных с контуром поверхностного дефекта.

Развивая данную мысль можно представить дефект как отрезок проводника с током [4].

На рис. 2 показана расчетная модель ВТП. Обмотки преобразователя и трещина представлены бесконечно тонкими проводниками.

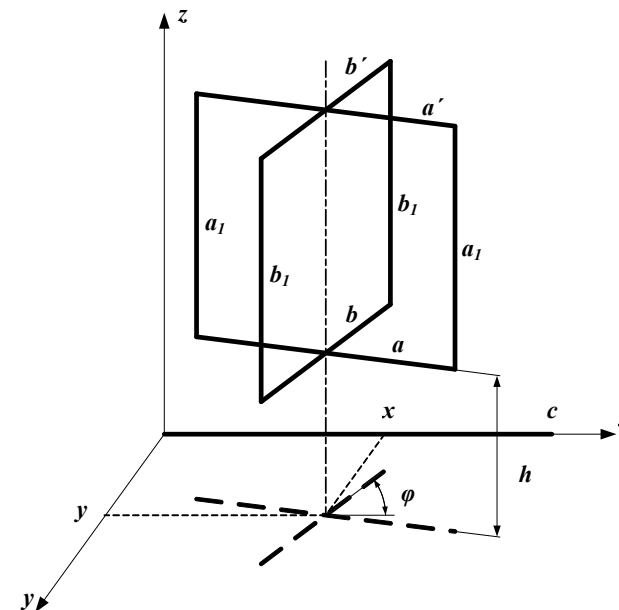


Рис.2. Расчетная модель взаимодействия ВТП с трещиной

На рисунке 2 обозначены:  $a$  – нижний участок возбуждающей обмотки;  $b$  – нижний участок измерительной обмотки;  $a_1$  – боковая сторона возбуждающей обмотки;  $b_1$  – боковая сторона измерительной обмотки;  $a'$  – верхний участок возбуждающей обмотки;  $b'$  – верхний участок измерительной обмотки;  $c$  – дефект;  $x, y$  – координаты проекции центра преобразователя;  $h$  – расстояние между дефектом и преобразователем (зазор);  $\varphi$  – угол между дефектом и измерительной обмоткой. Тогда искомые взаимноиндуктивности можно принять:

$$M_{12} = M_{ac} - M_{a'c}; \quad M_{23} = M_{bc} - M_{b'c} \quad (4)$$

Для нахождения  $M_{ac}$ ,  $M_{a'c}$ ,  $M_{bc}$ ,  $M_{b'c}$  воспользуемся соотношениями для линейных участков [12]. Тогда для  $M_{ac}$  можно записать:

$$M_{ac} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cos \varphi \left( x_2 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{22} + D_{21}} + y_2 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{22} + D_{12}} - x_1 \operatorname{Arth} \frac{a}{D_{11} + D_{12}} - y_1 \operatorname{Arth} \frac{c}{D_{11} + D_{21}} + \frac{h}{\sin \varphi} A \right); \quad (5)$$

$$A = \operatorname{arctg} \left( \frac{x_1 + y_1 + D_{11}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) + \operatorname{arctg} \left( \frac{x_2 + y_2 + D_{22}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{x_1 + y_2 + D_{12}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \operatorname{arctg} \left( \frac{x_2 + y_1 + D_{21}}{h} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right); \quad (6)$$

$$D_{11} = \sqrt{\left( x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left( y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (7)$$

$$D_{12} = \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left( y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (8)$$

$$D_{21} = \sqrt{\left( c - x - \frac{a}{2} \cos \varphi \right)^2 + \left( y - \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (9)$$

$$D_{22} = \sqrt{\left( x + \frac{a}{2} \cos \varphi - c \right)^2 + \left( y + \frac{a}{2} \sin \varphi \right)^2 + h^2}; \quad (10)$$

$$k^2 = D_{12}^2 + D_{21}^2 - D_{11}^2 - D_{22}^2; \quad (11)$$

$$x_1 = \frac{2a^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2) + k^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2)}{4c^2a^2 - k^4}c; \quad (12)$$

$$y_1 = \frac{c^2(D_{12}^2 - D_{11}^2 - a^2) + k^2(D_{21}^2 - D_{11}^2 - c^2)}{4c^2a^2 - k^4}a; \quad (13)$$

$$x_2 = x_1 + c; \quad y_2 = y_1 + a. \quad (14)$$

Для остальных участков вычисления производятся аналогично, в соответствующих координатах. Для  $M_{a'c}$ : вместо  $h - h + a_1$ ;  $M_{bc}$ : вместо  $\varphi - 90^\circ - \varphi$ , вместо  $a - b$ ;  $M_{b'c}$ : вместо  $\varphi - 90^\circ - \varphi$ , вместо  $a - b$ , вместо  $h - h + b_1$ .

На рис. 3 приведены результаты расчетов и экспериментов для угла ориентации преобразователя относительно трещины и для зазора.

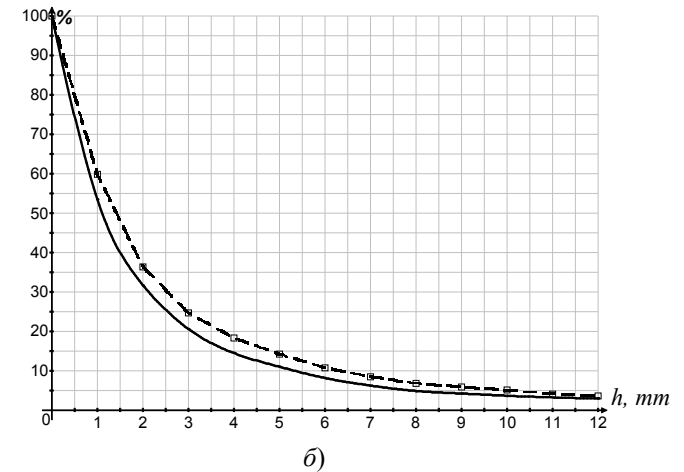
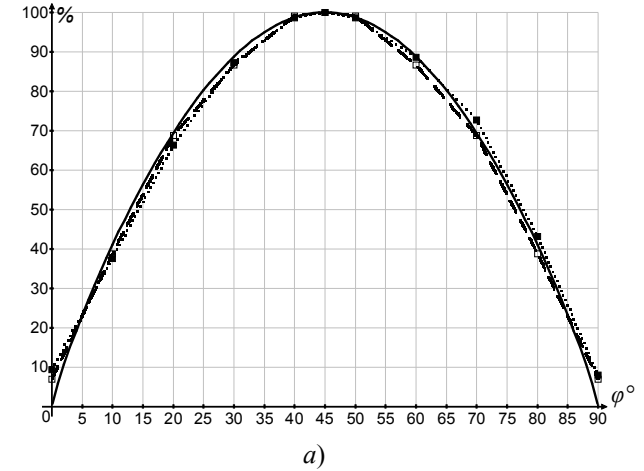


Рис. 3 – Зависимости сигнала ВТП от угла (а) и зазора (б) (расчетные кривые – сплошные)

**Выводы.** Результаты расчетов с использованием разработанной модели хорошо согласуются с экспериментами. Данная модель позволяет находить зависимости сигналов ВТП при заданных параметрах его обмоток и дефекта, а также их взаимного расположения. Целесообразно использовать такой подход для решения задач дефектоскопии вихрековым методом.

**Список литературы:** 1. *В.В. Клюев, Ю.К. Федосенко, В.Ф. Мужижкий.* Вихрековый контроль: современное состояние и перспективы развития // В мире неразрушающего контроля. – 2007. – №2. – с.4-9. 2. *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк.* Развитие возможностей вихрековой дефектоскопии // Методы та прилади контролю якості. – 2006. – № 17. – с.3-7. 3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 8 т. Под общ. ред. В.В.Клюева. Т 2: В 2 кн. – М.: Машиностроение, 2003. – 688 с: ил. Вихрековый контроль. Книга 2 / *Ю.К.Федосенко, В.Г.Герасимов, А.Д.Покровский, Ю.Я.Останин.* 4. *Хомяк Ю.В.* Фізична модель впливу тонкої поверхневої тріщини металевого зразка на накладний вихорострумний перетворювач // анотації доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я». – НТУ «ХПИ»– 2009. – С. 529. 5. *П.Н. Шкатов.* Математическая модель для решения задач электромагнитной дефектоскопии // Дефектоскопия. – 1988. – №1. – с.59-66. 6. *В.М. Синеглазов, В.Г. Вовк.* Математическое моделирование процесса вихрекового контроля // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2000. – №4. – с.26-29. 7. *П.Н. Шкатов, С.В. Клюев.* Математическое моделирование воздействия дефектов сплошности на вихрековые преобразователи // Контроль. Диагностика. – 2005. – №6. – с.17-21. 8. *В.Ф. Гамалий, С.В. Серебrenников, Д.В. Трушаков.* Математическое моделирование взаимодействия вихрекового преобразователя и ферромагнитного образца с трещиной // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 2007. – №2. – с.44-47. 9. *Г.М. Сучков, Ю.В. Хомяк.* Теоретическое исследование накладного вихрекового преобразователя с минимальной взаимной индуктивностью // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Харків: НТУ «ХПИ» – №48. – 2008. – с.100–103. 10. *В.Е. Щербинин, М.Л. Шур, Р.В. Загидулин.* Топографія магнітного поля узкого поверхнового дефекта // Дефектоскопия. – 1986. – №7. – с.86-88. 11. *Р.В. Загидулин.* К расчету признаков классификации дефектов сплошности конечной протяженности в ферромагнитных изделиях // Дефектоскопия. – 1995. – №10. – с.50-58. 12. *Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А.* Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.: ил.

УДК 620.179.16:620.179.17

*И.В. ТЮПА*, к-т техн. наук, докторант, НТУ «ХПИ»;  
*Б.М. ГОРКУНОВ*, к-т техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»;  
*А.А. АВРАМЕНКО*, к-т техн. наук, доц., НТУ «ХПИ»;  
*В.В. СКОПЕНКО*, соискатель, НТУ «ХПИ»;

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ В ПОПЕРЕЧНОМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

У роботі проведено експериментальні дослідження контролю дефектів циліндричних виробів у перпендикулярному до об'єкту контролю електромагнітному полі, яке створюється за допомогою котушок Гельмгольца. Вимірювання сигналу від дефекту здійснюється за допомогою двох взаємоперпендикулярних обмоток прохідного і накладного типу.

Experimental researches of control of defects of cylinder wares are in-process conducted in to perpendicular to the object control the electromagnetic field which is created by the spools of Helmholtz. Measuring of signal from a defect is carried out by two perpendicular coils of communicating and superimposed type.

**Введение.** В настоящее время для оценки структурного состояния и косвенного измерения механических напряжений и дефектов в изделиях из ферромагнитных материалов широко применяются магнитные и электромагнитные методы контроля, которые основанные на взаимосвязи магнитных и механических характеристик со структурными параметрами. Однако проблема контроля осложняется тем, что зачастую остается неизвестным состояние металла, химический состав и магнитная предыстория элементов конструкций. Поэтому возникает потребность экспериментальных исследований с привлечением широкого круга материалов и различным исходным состоянием [1].

Как показано в работе [2], при проведении исследований, на малоуглеродистых сталях Ст.20, Ст3 и низколегированных сталях 09Г2С и 10ХСНД. Выбор обусловлен тем, что эти стали:

широко применяются в различных отраслях промышленности;

относятся к разным категориям прочности, обладают хорошими характеристиками пластичности, характеризуются обычными и повышенными антикоррозионными свойствами и разной склонностью к циклическому упрочнению и разупрочнению, что имеет существенное значение при интерпретации результатов со сталями подобного класса;

позволяют описать поведение разных классов материалов и распространить полученные закономерности на все материалы, близкие к ним по составу и свойствам;

являются хорошим материалом для изучения физики магнитоупругих явлений вследствие низкого содержания углерода.