

УДК 620.179.14

## ВИХРЕТОКОВЫЙ МНОГОЧАСТОТНЫЙ ТОЛЩИНОМЕР

*А. В. ЧЕРНЫШЕВ, В. И. ШАРАНДО, И. Е. ЗАГОРСКИЙ*

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

Минск, Беларусь

UDC 620.179.14

## EDDY CURRENT MULTI-FREQUENCY THICKNESS METER

*A. V. CHERNYSHEV, V. I. SHARANDO, I. E. ZAGORSKY*

### Аннотация

В докладе сообщается о разработанном в ИПФ НАН Беларуси вихретоковом многочастотном толщиномере, у которого в процессе измерения толщины проводящего покрытия на проводящем основании частота тока возбуждения накладного преобразователя изменяется в некотором интервале. При определенных фиксированных значениях этой частоты производятся измерения фазы вносимой в преобразователь ЭДС и на основе анализа результатов измерений определяется толщина покрытия.

### Ключевые слова:

вихретоковый толщиномер, многочастотный способ, вносимая ЭДС, фаза, накладной преобразователь.

### Abstract

The report reports on the eddy current multi-frequency thickness meter developed at the Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, in which, during the measurement of the thickness of the conductive coating on a conductive substrate, the frequency of the excitation current of the transducer changes in a certain interval. For certain fixed values of this frequency, measurements are made of the phase of the emf introduced into the transducer and, based on the analysis of the measurement results, the thickness of the coating is determined.

### Key words:

eddy current thickness meter, multi-frequency method, introduced emf, phase, superimposed transducer.

При необходимости защиты деталей, узлов от коррозии на их поверхность наносится защитное покрытие, например, из цинка, олова, меди, серебра или никеля. При этом толщина покрытия должна находиться в определенном интервале допустимых значений, который определяется исходя из условий эксплуатации детали, узла. Контроль толщины покрытия в производственных условиях обычно производится с помощью толщиномеров. В ряде случаев оптимальным является применение вихретокового толщиномера.

В настоящее время известны различные вихретоковые толщиномеры, например, типа «Константа-К6», «ТЛ-1МП» [1], которые работают при

фиксированной частоте тока возбуждения накладного вихретокового преобразователя. Известен толщиномер типа «Константа-К6С» [2], в котором фактически содержится два накладных преобразователя, размещенных в одном корпусе. Один из них используется для определения электромагнитных параметров материала покрытия, который работает при относительно высокой частоте поступающего на него тока возбуждения. Второй накладной преобразователь работает при относительно низкой частоте его тока возбуждения. По фазе вносимой в него ЭДС определяется толщина покрытия. В результате достигается отстройка от влияния на результаты определения толщины покрытия вариаций электромагнитных параметров этого покрытия. Похожий двухчастотный способ контроля предложен в [3].

В ИПФ НАН Беларуси разработан многочастотный вихретоковый толщиномер, в котором для питания накладного преобразователя применяется ток возбуждения, частота которого в процессе измерения дискретно изменяется в определенном интервале. При каждой фиксированной частоте производятся измерения фазы (в качестве опорного сигнала фазометра используется напряжение, синфазное с током возбуждения преобразователя) вносимой в преобразователь ЭДС и на основе анализа полученных данных делается вывод о толщине покрытия. В результате удается повысить точность определения толщины покрытия при наличии вариаций электромагнитных параметров материалов как покрытия, так и основания.

Для примера в докладе приведены результаты расчетов зависимости фазы  $\varphi$  вносимой в накладной преобразователь ЭДС от толщины покрытия  $d$ , полученные при различных значениях удельной электропроводности покрытия  $\sigma_1$  и при различных частотах  $f$  тока возбуждения, пропускаемого по катушке возбуждения преобразователя. Расчеты проведены по известным аналитическим выражениям, приведенным, например, в работе [4]. Преобразователь состоит из двух витков – создающего электромагнитное поле возбуждения и измерительного – расположенных над проводящим ферромагнитным полупространством, на поверхности которого имеется проводящее покрытие. Методика расчета подобна примененной в работе [5].

Сначала приняты следующие электромагнитные параметры материалов покрытия и подложки. Для материала покрытия удельная электропроводность  $\sigma_1 = 5,291$  МСм/м (что примерно соответствует удельной электропроводности хрома, обозначим данное численное значение как  $\sigma_{10}$ ). Удельная электропроводность основания  $\sigma_2 = 11,5$  МСм/м, его относительная магнитная проницаемость  $\mu_2 = 100$ . Это примерно соответствует электропроводности и относительной магнитной проницаемости никеля. Амплитудное значение тока возбуждения принято равным 1А, радиусы  $R$  обоих витков одинаковы и равны 0,002 м, расстояние  $h$  от витка, создаю-

щего поле возбуждения, до поверхности полупространства составляет 0,001 м, измерительный виток расположен на середине этого расстояния.

Результаты расчетов, полученные при  $f = 300$  кГц, представлены на рис. 1 линией 1. При такой частоте глубина проникновения  $\delta_s$  плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 400 мкм. При этом по вертикальной координатной оси отложены не значения  $\varphi$ , а абсолютная величина разности фаз  $\varphi - \varphi_{Cu}$ , где  $\varphi_{Cu}$  – фаза вносимой в измерительный виток эдс при расположении преобразователя над медным полупространством (электропроводность меди принята равной 58,1 МСм/м). Абсолютное значение разности  $\varphi - \varphi_{Cu}$  обозначено как  $\Delta\varphi$ . Цифрой 2 на рис. 1 обозначена зависимость  $\Delta\varphi$  от  $d$ , полученная при значении  $\sigma_1$ , превышающем величину  $\sigma_{10}$  на 20 %, а цифрой 3 – при  $\sigma_1$  меньшей  $\sigma_{10}$  на 20 %.

Рассмотрим, как вариации величины  $\sigma_1$  сказываются на погрешности определения толщины покрытия  $d$ , определяемой по значениям  $\Delta\varphi$ .

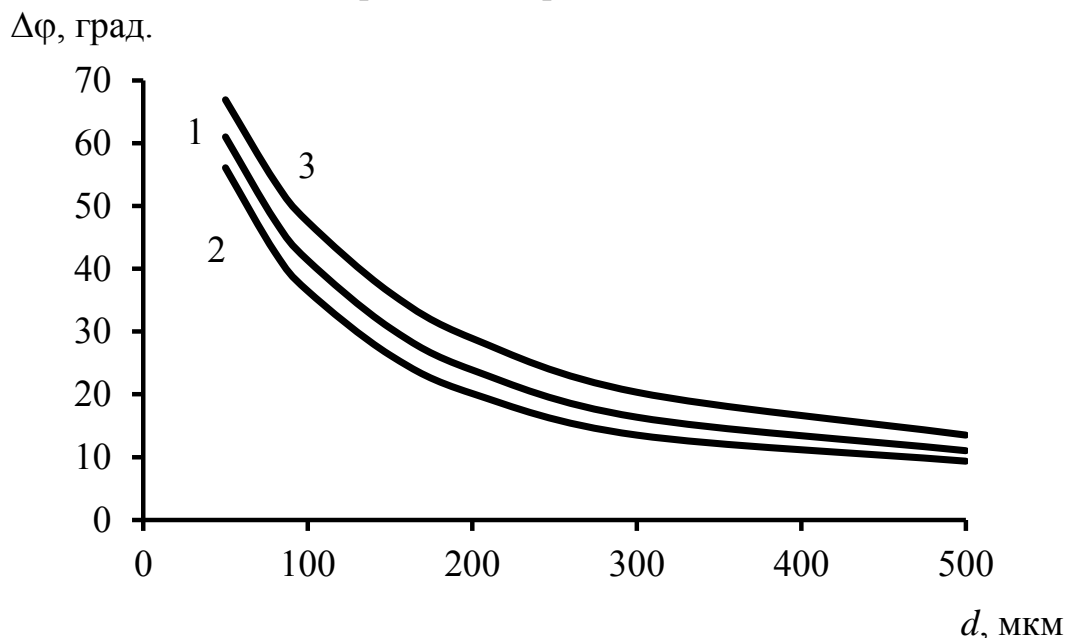


Рис. 1. Зависимость  $\Delta\varphi$  от  $d$  при  $f=300$  кГц: 1 –  $\sigma_1 = 5,291$  МСм/м; 2 –  $\sigma_1 = 6,3492$  МСм/м; 3 –  $\sigma_1 = 4,2328$  МСм/м

Предположим, что зависимость  $\Delta\varphi$  от  $d$ , представленная линией 1 на рис. 1, используется в вихретоковом толщиномере в качестве калибровочной, т. е. на основе измерения значения  $\Delta\varphi$  определяется толщина покрытия  $d$ . Основываясь на данных, приведенных на рис. 1, определим, к какой относительной погрешности  $\delta_d$  определения  $d$  при помощи этого толщиномера приведут вариации величины  $\sigma_1$  на  $\pm 20$  % относительно значения  $\sigma_{10}$ . Анализ расчетных данных показывает, что в области толщин порядка 50 мкм максимальная относительная погрешность  $\delta_d$  определения толщи-

ны покрытия составляет 31,7 %, в области толщин порядка 450 мкм значение  $\delta_d$  равно 33 %.

Из приведенных данных следует, что для уменьшения относительной погрешности  $\delta_d$  определения толщины покрытия, вызванной вариациями величины  $\sigma_1$ , необходимо определять значение  $\sigma_1$  при относительно высокой частоте  $f$ , при которой на результаты измерения не оказывают влияния электромагнитные параметры материала основания (из-за относительно малой глубины проникновения поля возбуждения). Затем определенное значение  $\sigma_1$  необходимо учитывать при анализе результатов измерения фазы  $\varphi$  вносимой эдс преобразователя (с целью определения по значению  $\varphi$  толщины покрытия  $d$ ) при более низкой рабочей частоте  $f$  толщиномера. Рассмотрим возможность определения величины  $\sigma_1$  на основе измерений  $\Delta\varphi$  при относительной высокой частоте  $f$ .

На рис. 2 приведены результаты расчета зависимостей  $\Delta\varphi$  от  $d$ , полученные при  $f = 5,8$  МГц и прежних параметрах преобразователя и двухслойного образца. Как и на рис. 1, цифрой 2 на рис. 2 обозначена зависимость, полученная при значении  $\sigma_1$ , превышающем  $\sigma_{10}$  на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине  $\sigma_1$ , меньшей  $\sigma_{10}$  на 20 %, цифрой 1 обозначена зависимость, полученная при  $\sigma_1 = \sigma_{10}$ .

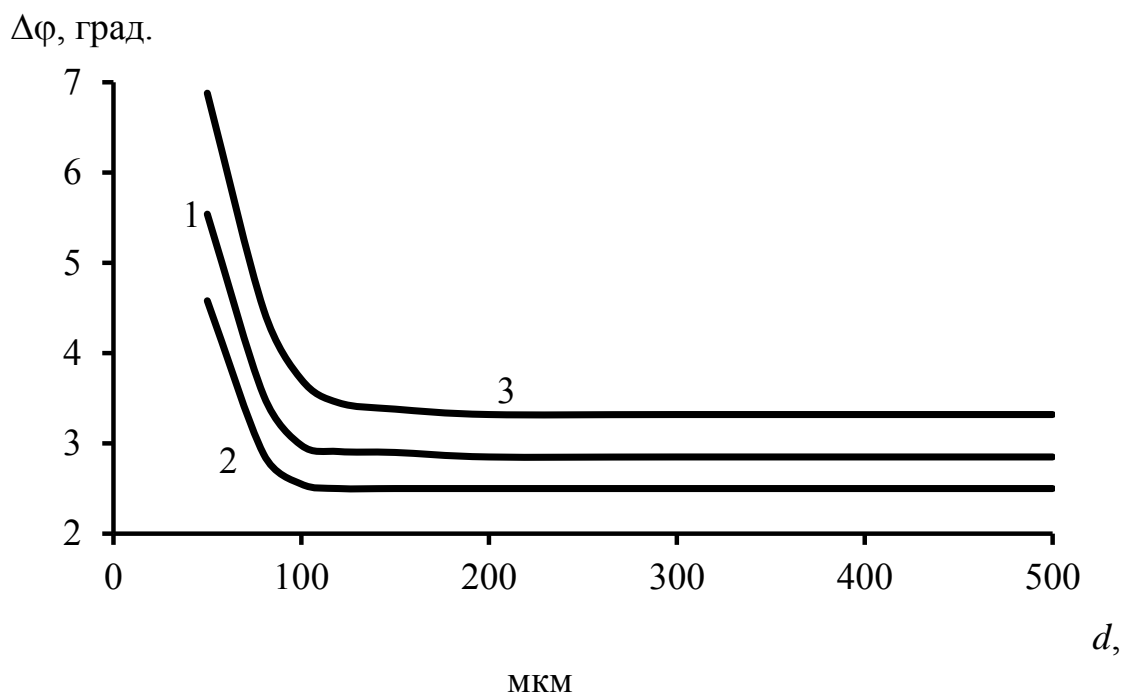


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\varphi$  от  $d$  при  $f = 5,8$  МГц: 1 –  $\sigma_1 = 5,291$  МСм/м; 2 –  $\sigma_1 = 6,3492$  МСм/м; 3 –  $\sigma_1 = 4,2328$  МСм/м

Из рис. 2 следует, что при данной относительно высокой частоте  $f$  отсутствует зависимость  $\Delta\varphi$  от толщины  $d$  покрытия, когда она превышает 200 мкм. Это объясняется поверхностным эффектом, в результате которого

ограничена глубина проникновения переменного электромагнитного поля возбуждения в проводящий материал. (При  $f = 5,8$  МГц для рассматриваемого материала с  $\sigma_{10} = 5,291$  МСм/м значение  $\delta_s = 91$  мкм.) При  $d > 200$  мкм, как следует из рис. 2, увеличение  $\sigma_1$  относительно значения  $\sigma_{10}$  на 20% приводит к уменьшению  $\Delta\varphi$  на 12 % относительно того значения, которое имеет место при  $\sigma_1 = \sigma_{10}$ . Уменьшение же  $\sigma_1$  относительно  $\sigma_{10}$  на 20 % приводит соответственно к увеличению  $\Delta\varphi$  на 18 %. Из приведенных данных следует, что при относительно высокой частоте  $f$  поля возбуждения по измерениям величины  $\varphi$  можно определять значение удельной электропроводности материала покрытия  $\sigma_1$ .

Как видно из рис. 2, при  $d \geq 200$  мкм увеличение  $\sigma_1$  на 20 % относительно  $\sigma_{10}$  приводит к изменению  $\Delta\varphi$  (и, соответственно,  $\varphi$ ) на  $0,35^\circ$ . Это показывает, что для точного определения величины  $\sigma_1$  необходимо обеспечить высокую точность измерения  $\varphi$ . Для толщиномера разработан фазометр, определяющий величину  $\varphi$  с абсолютной погрешностью  $\pm 0,05^\circ$  в диапазоне частот от 1 до 10 МГц.

Разработанный многочастотный вихретоковый толщиномер позволяет повысить точность определения толщины покрытия при неоднородном распределении электромагнитных параметров покрытия по его толщине. Кроме этого, достигается в большей степени, чем при двухчастотном способе вихретоковой толщинометрии, отстройка от влияния вариаций электромагнитных параметров основания на результаты определения толщины покрытия.

В качестве примера на рис. 3 приведены расчетные зависимости фазы вносимой в преобразователь ЭДС от частоты тока возбуждения преобразователя при различных толщинах  $d$  покрытия. Расчет проведен при  $\sigma_1 = 5,24$  МСм/м, удельная электропроводность основания  $\sigma_2$  принята равной  $14,6$  МСм/м, его относительная магнитная проницаемость  $\mu_2 = 300$ . Из рис. 3 следует, что при  $f = 8$  МГц значения  $\varphi$  одинаковы для всех трех образцов (т. е. при такой частоте основной вклад в формирование  $\varphi$  вносит только материал покрытия образцов). Затем, по мере уменьшения  $f$ , примерно при  $f = 6$  МГц, у образца с толщиной покрытия  $d = 100$  мкм на формирование  $\varphi$  начинает оказывать влияние и материал основания этого образца. При  $f$  примерно равной  $3,5$  МГц уже и у образца с толщиной покрытия  $200$  мкм на формирование  $\varphi$  начинает оказывать влияние и материал его основания. При изменении  $\sigma_1$  соответственно изменяется характер зависимостей  $\varphi$  от  $f$ . Например, при увеличении  $\sigma_1$  до  $5,7$  МСм/м фаза  $\varphi$  при  $f = 10$  МГц возрастает, по абсолютному значению (относительно первоначального случая, когда  $\sigma_1$  равнялась  $5,24$  МСм/м) на  $0,1^\circ$ . Это еще раз показывает, что требования к точности фазометра высоки.

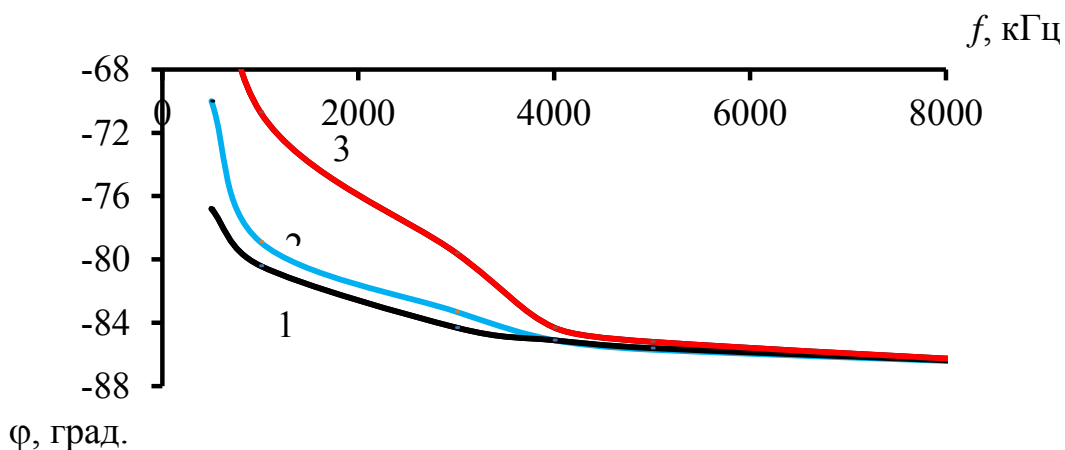


Рис. 3. Зависимость  $\varphi$  от  $f$  при: 1 –  $d = 1$  м; 2 –  $d = 200$  мкм; 3 –  $d = 100$  мкм

Практически многочастотный способ контроля реализуется следующим образом. При относительно высокой частоте  $f$  (при которой материал основания не вносит вклад в формирование  $\varphi$ ) определяется величина  $\varphi$ , зависящая от электромагнитных параметров только покрытия. После этого, при известных параметрах накладного преобразователя, рассчитывается значение  $\sigma_1$  (например, на основе работ [4, 6]). После этого, также на основе расчетов, теперь уже для известного значения  $\sigma_1$  и при известных электромагнитных параметрах основания, находится зависимость  $\varphi$  от  $f$  при различных толщинах покрытия  $d$ . На основе сравнения полученной экспериментально зависимости  $\varphi$  от  $f$  с расчетными определяется толщина покрытия  $d$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакунов, А. С. Толщиномер гальванических покрытий ТЛ-1МП / А. С. Бакунов [и др.] // Дефектоскопия. – 2004. – № 6. – С. 80–84.
2. Сясько, В. А. Измерение толщины напыляемых никелевых покрытий на крупногабаритных чугунных изделиях / В. А. Сясько // Записки Горного ин-та. – 2016. – Т. 221. – С. 712–716.
3. Пат. МПК7 G01B 7/06. Вихретоковый способ двухчастотного контроля изделий / Н. Г. Богданов, В. А. Приходько, А. И. Суздальцев; заявитель Орловский государственный техн. ун-т. – № 2184931 ; заявл. 03.02.00 ; опубл. 10.07.02, Бюл. изобр. № 19.
4. Соболев, В. С. Накладные и экранные датчики / В. С. Соболев, Ю. М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
5. Чернышев, А. В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем / А. В. Чернышев // Приборы и методы измерений. – 2014. – № 1 (8). – С. 73–77.
6. Li, Y. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens / Y. Li, T. Theodoulidis, G. YunTian // IEEE Trans. Magn. – 2007. – V. 43. – P. 4010–4015.

E-mail: lab5@iaph.bas-net.by