

А. В. Чернышев, И. Е. Загорский, В. И. Шарандо

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

МНОГОЧАСТОТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ДЛЯ ВИХРЕТОКОВОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

Аннотация. При вихретоковой толщинометрии одним из мешающих факторов, обуславливающим погрешности определения толщины проводящего покрытия на проводящей ферромагнитной или неферромагнитной подложке, являются вариации электромагнитных параметров покрытия и подложки, наблюдаемые при перемещении преобразователя от точки к точке по поверхности контролируемого изделия, при переходе от одного изделия к другому, при наличии термообработки или другого термического воздействия на контролируемое изделие после нанесения покрытия. В работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния вариаций электромагнитных параметров проводящей ферромагнитной подложки на фазу вносимой в накладной преобразователь ЭДС. Показано, когда достигается минимальное влияние таких вариаций на указанную фазу. В результате для уменьшения влияния вариаций электромагнитных параметров на точность определения толщины покрытия при фазовом способе контроля предложено использовать многочастотный метод. Он состоит в том, что частоту тока возбуждения преобразователя, установленного на контролируемое изделие, при проведении измерений дискретно уменьшают от некоторой максимальной до определенной минимальной частоты. При высокой частоте производится учет удельной электрической проводимости материала покрытия, при уменьшении частоты определяется такое ее значение, когда на формирование фазы начинают оказывать влияние электромагнитные параметры подложки. Затем с использованием калибровочной зависимости, полученной с образцов из того же материала покрытия и подложки, что и контролируемое изделие, и имеющих известную толщину покрытий, определяют искомую толщину покрытия на контролируемом изделии.

Ключевые слова: толщиномер, вихретоковый метод, удельная электрическая проводимость, проводящее покрытие, толщина слоя, погрешность определения толщины

Для цитирования: Чернышев, А. В. Многочастотный метод контроля для вихретоковой толщинометрии / А. В. Чернышев, И. Е. Загорский, В. И. Шарандо // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 118–126. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-118-126>

A. V. Chernyshev, I. E. Zagorskiy, V. I. Sharando

Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

MULTI-FREQUENCY METHOD OF CONTROL FOR EDDY CURRENT THICKNESS MEASUREMENT

Abstract. When eddy-current thickness measurement is carried out, one of the disturbing factors leading to an error in determining the thickness of the conductive coating on a conducting ferromagnetic or non-ferromagnetic substrate are the variations of the electromagnetic parameters of the coating and the substrate observed when the transducer moves from point to point along the surface of the controlled product, when moving from one product to another, at presence of heat treatment or other thermal effects on the controlled product after coating. The paper presents the results of experimental studies of the influence of variations in the electromagnetic parameters of a conducting ferromagnetic substrate on the phase of the emf, introduced into the superimposed transducer. It is shown, when the minimum influence of such variations on the specified phase is achieved. As a result, it was suggested to use the multi-frequency method to reduce the influence of variations of electromagnetic parameters on the accuracy of determining the coating thickness during application of the phase control method. It consists in the fact that the frequency of the excitation current of the transducer, mounted on the monitored product, is discretely reduced from a certain maximum to a certain minimum frequency during measurements. At the high frequency, the specific electric conductivity of the coating material is taken into account, with decreasing frequency, such a value is determined when the electromagnetic parameters of the substrate begin to affect the phase formation. Then, using the calibration curve obtained from samples from the same coating material and substrate as the controlled article and having a known coating thickness, the desired coating thickness on the product to be tested is determined.

Keywords: thickness gauge, eddy current method, conductivity, conductive coating, layer thickness, thickness measurement error

For citation: Chernyshev A. V., Zagorskiy I. E., Sharando V. I. Multi-frequency method of control for eddy current thickness measurement. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 118–126 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-118-126>

Введение. При вихретоковой толщинометрии двухслойной структуры, состоящей из проводящего верхнего слоя (покрытия), который расположен на проводящем ферромагнитном или немагнитном основании (подложке), эффективным является контроль, основанный на измерениях фазы φ вносимой в накладной преобразователь ЭДС [1, 2]. По ее значению определяют толщину покрытия d . Отсчет фазы φ часто ведется относительно тока возбуждения преобразователя, изменяющегося по гармоническому закону. Фаза вносимой в измерительную обмотку ЭДС зависит от геометрических параметров преобразователя, частоты тока возбуждения f , зазора между преобразователем и объектом контроля (ОК), удельных электрических проводимостей покрытия σ_1 и основания σ_2 , а также от относительной магнитной проницаемости основания μ_2 (если оно ферромагнитное) и толщины покрытия d .

На практике часто наблюдаются вариации величин σ_1 , σ_2 и μ_2 при перемещении от точки к точке по поверхности ОК или при переходе от одного ОК к другому. Это обуславливает вариации φ при неизменном значении d , что в результате приводит к погрешности определения d . При этом амплитудная, фазовая, амплитудно-фазовая отстройки от влияния вариаций σ_1 на результаты измерения d практически невозможны [3]. Уменьшить влияние вариаций величин σ_1 и σ_2 на показания вихретокового толщиномера можно путем понижения частоты f [1], однако в этом случае препятствующими факторами могут стать вариации толщины подложки и вариации значения μ_2 .

Снизить влияние вариаций σ_1 на точность определения d вихретоковым толщиномером возможно при последовательном воздействии двух рабочих частот преобразователя – высокой и низкой [4]. При использовании высокой частоты фаза вносимого в преобразователь напряжения φ_1 зависит только от σ_1 из-за относительно малой глубины проникновения электромагнитного поля возбуждения в ОК, в результате чего влияние электромагнитных параметров подложки на φ_1 отсутствует. При низкой частоте поля возбуждения фаза φ вносимого в преобразователь напряжения зависит уже не только от σ_1 , но и от d (при постоянстве всех остальных параметров) ввиду большей глубины проникновения электромагнитного поля возбуждения в ОК. На основе измеренного значения φ с учетом введения определенной корректировки, основанной на определенном значении σ_1 , находится величина d . Аналогичный способ уменьшения погрешности определения толщины никелевого покрытия применен в вихретоковом толщиномере «Константа КБС» [5] с той лишь разницей, что в этом приборе достигается отстройка от влияния вариаций на результат определения d относительной магнитной проницаемости покрытия, при этом полагается, что σ_1 постоянна.

При низкой f вихретокового толщиномера, при которой величина φ обусловлена d , фаза тока возбуждения зависит и от электромагнитных параметров материала подложки σ_2 и μ_2 . При наличии вариаций этих параметров наблюдается появление дополнительной погрешности определения d на основе измерения φ . Для устранения данного мешающего фактора применяется предварительное измерение φ при установке вихретокового преобразователя толщиномера на подложку при отсутствии на ней покрытия. Однако это не всегда может обеспечить отстройку от влияния вариаций электромагнитных параметров подложки на результаты определения d . Например, если после нанесения покрытия изделие подвергается какому-либо термическому воздействию (например, отжигу, отпуску), то электромагнитные параметры подложки после этого могут измениться относительно первоначальных значений, которые были до нанесения покрытия. Следовательно, зависимость φ от d , полученная до термического воздействия, будет отличаться от реальной, которая будет иметь место после термического воздействия на ОК.

В статье представлена методика применения многочастотного метода для учета вариаций удельной электрической проводимости покрытия и сведения к минимуму влияния вариаций электромагнитных параметров подложки на фазу вносимой в преобразователь ЭДС, в результате чего повышается точность определения толщины покрытия при вихретоковой толщинометрии.

Экспериментальное исследование влияния вариаций электромагнитных параметров подложки на фазу вносимой ЭДС вихретокового преобразователя. В качестве накладного преобразователя нами использовался трехобмоточный трансформаторный преобразователь с ферритовым сердечником, измерительная и компенсационная обмотки которого включены между собой дифференциально. Для повышения чувствительности обмотка возбуждения подключалась к генератору синусоидального напряжения по резонансной схеме [6], частота генератора в процессе измерений дискретно изменялась от некоторого максимального до определенного минимального значения. При выбранных фиксированных значениях частоты f_i измерялась величина фазового сдвига φ между выходным напряжением преобразователя и током возбуждения, проходившим по его обмотке возбуждения. Абсолютная погрешность при измерениях φ составляла $\pm 0,05^\circ$. Наружный диаметр обмоток преобразователя был равен 4 мм.

Рассмотрим пример, как на величину φ влияют вариации электромагнитных параметров подложки из никеля, на котором расположено проводящее покрытие. В качестве подложки применялись две никелевые пластины размером $300 \times 300 \times 0,3$ мм. Обе подложки были получены посредством электрохимического осаждения, одна из них подвергалась в течение 4 ч отпуску в вакууме при температуре 400°C . Как известно, в слое никеля при его электрохимическом осаждении возникают механические напряжения [7], которые уменьшаются при отпуске. Так как напряжения оказывают влияние на плотности точечных дефектов кристаллов металла, дислокаций, то они воздействуют и на величины магнитной проницаемости и удельной электропроводности, зависящие от плотности указанных дефектов [8, 9]. Соответственно, указанные электромагнитные параметры у подвергнутой отпуску и без отпуска никелевых пластин будут различны. При установке вихретокового преобразователя последовательно на указанные пластины (без покрытия) φ будут иметь различные значения. Например, при $f = 925$ кГц различие между абсолютными значениями φ , измеренными на двух указанных пластинах, составляет $1,3^\circ$ (имеется в виду абсолютное значение этой разности). Обозначим это различие как $\Delta\varphi$.

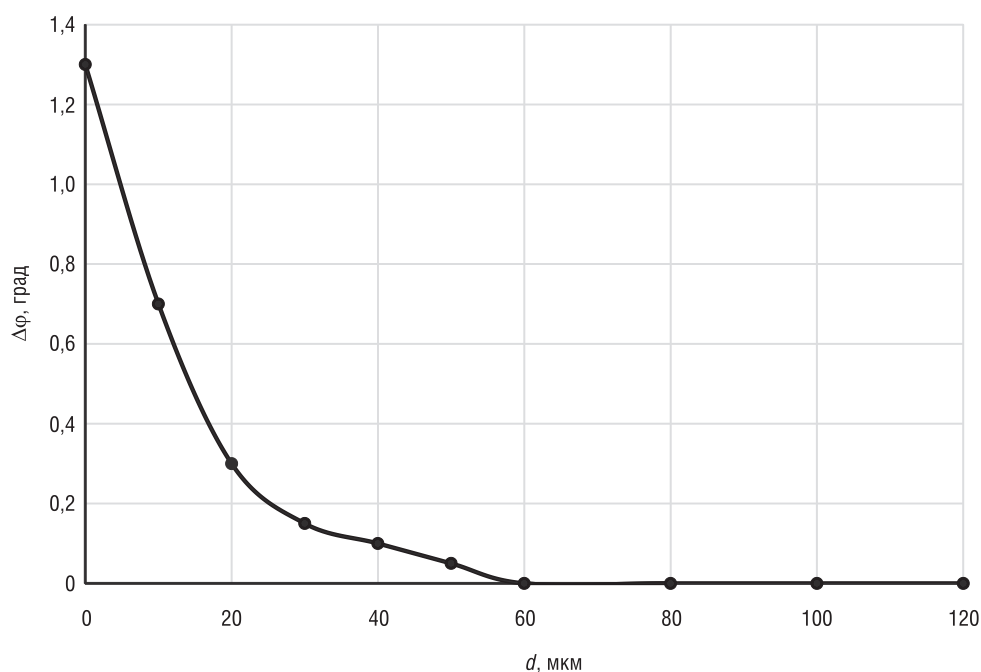


Рис. 1. Зависимость абсолютного значения разности фаз $\Delta\varphi$ выходного напряжения преобразователя от толщины покрытия d при измерениях на никелевых подложках с разными электромагнитными параметрами

Fig. 1. Dependence of the absolute value of the phase difference $\Delta\varphi$ of the output voltage of transducer on the coating thickness d for measurements on nickel substrates with different electromagnetic parameters

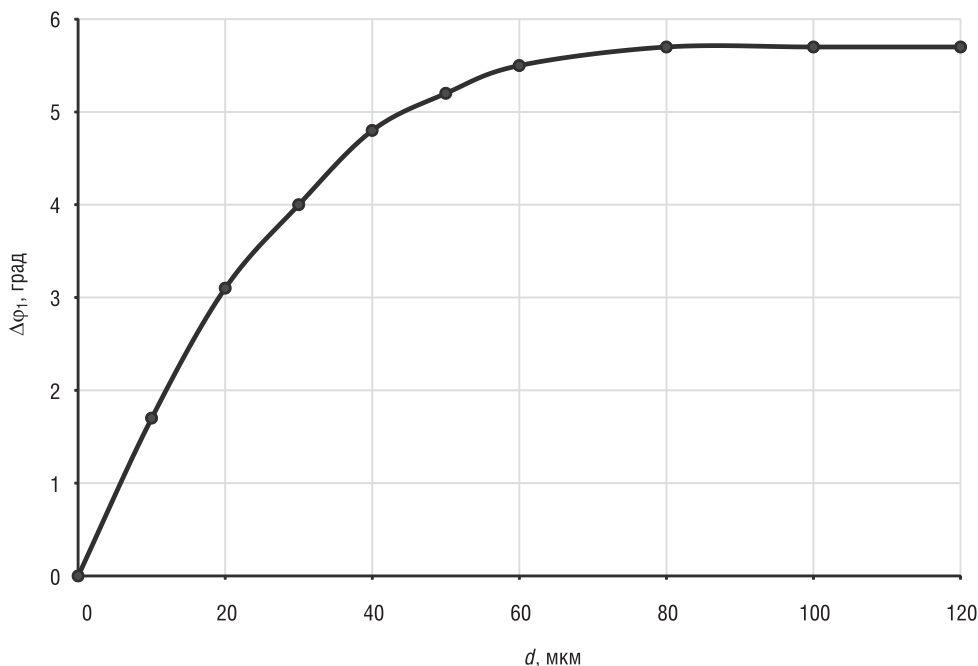


Рис. 2. Зависимость абсолютного приращения фазы $\Delta\varphi_1$ выходного напряжения преобразователя от толщины покрытия d на никелевой подложке

Fig. 2. Dependence of the absolute phase increment $\Delta\varphi_1$ of the output voltage of transducer on the thickness of the coating d on a nickel substrate

Рассмотрим, как эти различия в электромагнитных параметрах подложек, которыми являются указанные две пластины никеля, обнаружатся при измерении φ в случае, когда на этих подложках имеются проводящие покрытия. Проводящие покрытия различной толщины имитировались наложением на пластины никеля разного количества алюминиевых пластин тех же размеров 300×300 мм, толщина одной пластины составляла 10 мкм. Измерения проводились при $f = 925$ кГц. Теперь $\Delta\varphi$ обозначает различие между абсолютными значениями φ , измеренными на двух указанных пластинах никеля при наличии на них покрытия. Результаты измеренной зависимости $\Delta\varphi$ от толщины покрытия d показаны на рис. 1. Видно, что наибольшее влияние вариации электромагнитных параметров подложки на величину φ имеют при $d \leq 20$ мкм. При $d > 60$ мкм влияние вариаций электромагнитных параметров подложки на φ отсутствует ввиду наличия затухания амплитуды электромагнитного поля возбуждения по мере проникновения в глубину рассматриваемого образца.

Рассмотрим зависимость φ от d в случае, когда в качестве подложки используется только одна пластина из никеля, например подвергнутая отпуску (при прежнем значении $f = 925$ кГц). Для удобства возьмем не абсолютное значение φ , а приращение абсолютного значения φ при установке преобразователя на образец с покрытием относительно того абсолютного значения φ , которое имеет место при установке преобразователя на подложку без покрытия. Обозначим значение фазы в этом случае как φ_0 . Таким образом, указанное приращение фазы $\Delta\varphi_1$ определяется как $\Delta\varphi_1 = |\varphi| - |\varphi_0|$. Зависимость $\Delta\varphi_1$ от d показана на рис. 2. Видно, что максимальная чувствительность $\Delta\varphi_1$ к d наблюдается на том же интервале $d \leq 20$ мкм, где отмечается наибольшее влияние вариации электромагнитных параметров подложки на $\Delta\varphi$ (см. рис. 1).

Сравнив рис. 1 и 2, можно сделать вывод, что возможна практически полная (в пределах погрешности измерения фазы) отстройка от влияния вариаций электромагнитных параметров подложки (в пределах указанной погрешности измерения φ) на результаты измерения d , что наблюдается при значениях d в интервале от 60 до 80 мкм. Однако при этом отмечается минимальная чувствительность величины $\Delta\varphi_1$ к d по сравнению с той, которая наблюдалась при $d < 60$ мкм.

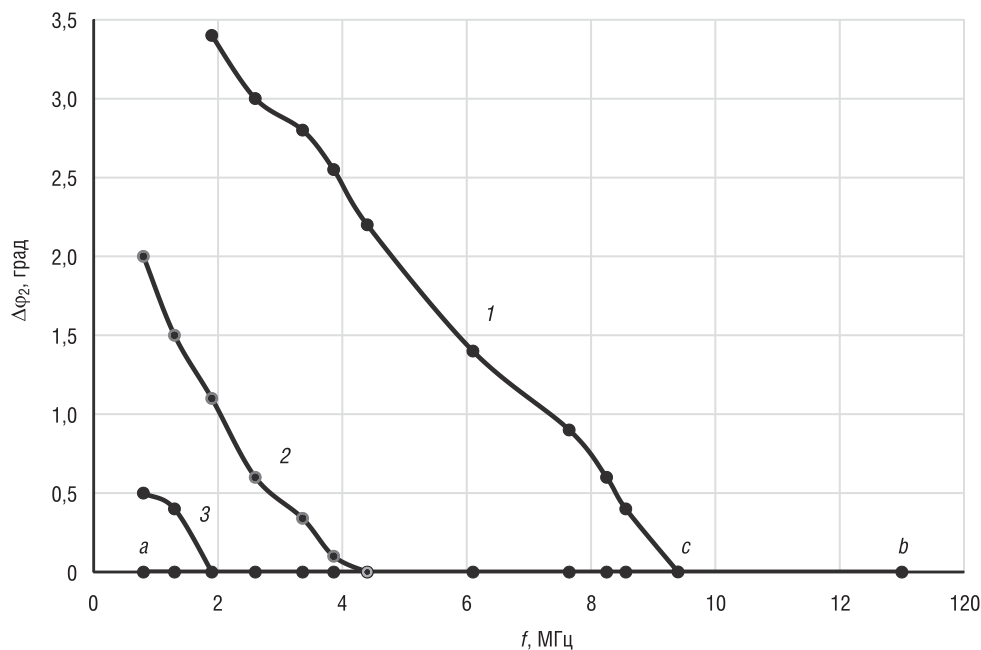


Рис. 3. Зависимость приращения абсолютного значения фазы $\Delta\varphi_2$ выходного напряжения преобразователя (относительно образца со слоем хрома $d = 343 \mu\text{м}$) от f при различных толщинах d хрома: 1 – $d = 43 \mu\text{м}$; 2 – $d = 109 \mu\text{м}$; 3 – $d = 208 \mu\text{м}$

Fig. 3. Dependence of the increment in the absolute value of phase $\Delta\varphi_2$ of the output voltage of transducer (relative to the sample with a chromium layer $d = 343 \mu\text{m}$) from f for different thicknesses d of chromium: 1 – $d = 43 \mu\text{m}$; 2 – $d = 109 \mu\text{m}$; 3 – $d = 208 \mu\text{m}$

Возможность определения толщины проводящего покрытия на проводящей подложке при многочастотном способе контроля. Из предыдущего раздела следует вывод, что при фазовом способе контроля при определенной частоте тока возбуждения накладного вихретокового преобразователя возможна практически полная отстройка от влияния вариаций электромагнитных параметров подложки на результаты измерения d . Такая частота зависит от электромагнитных параметров покрытия и его толщины. Это объясняется следующим. Максимальное влияние вариаций электромагнитных параметров подложки на φ будет наблюдаться при минимальной толщине покрытия. По мере роста d увеличивается вклад в формирование значения φ удельной электропроводности покрытия и уменьшается вклад от электромагнитных параметров подложки ввиду затухания амплитуды поля возбуждения по мере его проникновения в двухслойный образец, частота f полагается при этом постоянной. Начиная с относительно большой толщины покрытия, вклад от электромагнитных параметров подложки в формирование φ станет практически равным нулю. На основе этого и разработана предлагаемая методика определения d на основе фазовых измерений при применении последовательно нескольких частот тока возбуждения вихретокового преобразователя.

Первоначальные измерения проводятся при такой относительно высокой частоте f_h , при которой формирование φ происходит только под действием вихревых токов в покрытии, зависящих от σ_1 . После этого частота f уменьшается до некоторого фиксированного значения f_1 , снова проводятся измерения φ , затем f уменьшается до значения f_2 и так далее, до достижения некоторой минимальной частоты f_1 . В результате получаем набор из n значений фазы φ , соответствующих определенным n значениям частоты тока возбуждения, а именно $f_h, f_1, f_2, \dots, f_{n-2}, f_1$. При некоторой частоте f_i вклад в формирование φ начинают оказывать не только вихревые токи, наводимые в покрытии, но и возникающие в подложке. Фиксация этого момента и позволяет определить d , однако предварительно необходимо получить калибровочные зависимости. Для этого надо провести аналогичные измерения φ при изменениях f от f_h до f_1 на калибровочных образцах с известными значениями толщин покрытий на их поверхности. Материалы покрытий и подложки калибровочных образцов должны быть такими же, как и у подлежащих контролю изделий.

Рассмотрим пример нахождения калибровочных зависимостей с использованием четырех образцов, у которых на никелевую подложку нанесен слой хрома. Образец имеет латунное основание размером 40×40 мм и толщиной 9 мм. На одну из сторон латунного основания сначала электрохимическим способом наносился слой никеля толщиной 200 мкм, а поверх него – слой хрома. Толщина d хрома у образцов составляла 43, 109, 208 и 343 мкм. Максимальная частота поля возбуждения f_h была выбрана равной 13 МГц, при которой величина φ при измерениях на указанных калибровочных образцах зависит только от удельной электрической проводимости хрома. Измерения на всех четырех калибровочных образцах показали, что при $f = f_h$ величина φ одинакова (в пределах погрешности измерений) для всех образцов. Следовательно, можно считать, что σ_1 хромового покрытия на всех четырех калибровочных образцах также одинакова.

Результаты измерений φ на указанных четырех калибровочных образцах при различных f представлены на рис. 3. При этом по оси ординат приведена величина $\Delta\varphi_2$, определяемая как $\Delta\varphi_2 = \|\varphi_{343}\| - |\varphi_d|$, где $|\varphi_{343}|$ – абсолютное значение фазы при измерениях на калибровочном образце с самой большой толщиной хрома $d = 343$ мкм, $|\varphi_d|$ – абсолютное значение фазы при измерениях на каком-либо другом калибровочном образце. Зависимость $\Delta\varphi_2$ от f , соответствующая измерениям на калибровочном образце с толщиной хрома $d = 343$ мкм (в этом случае $\Delta\varphi_2 = 0$) представлена линией ab . Зависимость $\Delta\varphi_2$ от f , полученная при измерениях на калибровочном образце с $d = 43$ мкм, обозначена кривой 1, зависимость с калибровочного образца, у которого $d = 109$ мкм, показана кривой 2 и зависимость с калибровочного образца, у которого $d = 208$ мкм, обозначена кривой 3. Видно, что по мере уменьшения f от величины f_h (и увеличении при этом глубины проникновения электромагнитного поля в образец) при значении f , меньшем 9,4 МГц (точка c на рис. 3), на формирование φ у калибровочного образца с $d = 43$ мкм начинают оказывать влияние вихревые токи, наводимые в никелевой подложке. В результате $\Delta\varphi_2$ становится отличной от нуля, при последующем уменьшении f величина $\Delta\varphi_2$ будет изменяться по кривой 1. При измерениях на калибровочном образце с $d = 109$ мкм вихревые токи, наводимые в никелевой подложке, начнут оказывать влияние на формирование φ при f , меньшей 4,4 МГц. Для калибровочного образца с $d = 208$ мкм такое влияние будет наблюдаться при $f < 1,9$ МГц.

Из приведенных результатов следует, что на основе анализа зависимости $\Delta\varphi_2$ от f , определенной при дискретных изменениях f в заданном диапазоне частот, можно получить информацию о толщине d проводящего покрытия на проводящей подложке. Эта информация содержится в значении f , при котором величина $\Delta\varphi_2$ начинает отличаться от нулевой.

Методика определения толщины проводящего покрытия на проводящей подложке при многочастотном способе контроля. Рассмотрим, как на практике осуществить контроль толщины проводящего покрытия на проводящей ферромагнитной или неферромагнитной подложке, основываясь на приведенных экспериментальных данных. Для этого необходимо иметь набор калибровочных образцов с различными (известными) толщинами покрытий, которые характеризуются близкими между собой значениями σ_1 . Материалы покрытия и подложки на калибровочных образцах должны соответствовать материалам, из которых изготовлены подлежащие контролю изделия. Минимальная d_{\min} и максимальная d_{\max} толщины покрытий на калибровочных образцах должны быть такими, чтобы толщины покрытий на подлежащих контролю изделиях находились в пределах интервала $d_{\min} \div d_{\max}$.

Исходя из значения d_{\min} и предполагаемого значения σ_1 покрытия (например, взятого из справочной литературы), выбирается значение частоты f_h . После проведения измерения φ при $f = f_h$ на всех имеющихся калибровочных образцах, следует убедиться, что фаза φ имеет одинаковое (в пределах погрешности измерений) значение φ_{hk} .

Затем в процессе уменьшения f от f_h при определенном фиксированном значении f_i необходимо измерить значения φ при установке преобразователя на калибровочные образцы. В результате для каждого калибровочного образца получаем набор из n значений φ , соответствующих определенным частотам f_i : $f_h, f_1, f_2, \dots, f_{n-2}, f_1$. После этого для каждого калибровочного образца при фиксированном значении f_i необходимо определить величину $\Delta\varphi_2$. В данном случае $\Delta\varphi_2$ определяется из выражения $\Delta\varphi_2 = \|\varphi_{d_{\max}}\| - |\varphi_d|$, где $\varphi_{d_{\max}}$ – фаза, измеренная на калибровочном образце, который имеет максимальную толщину d_{\max} покрытия; φ_d – значение фазы при измерениях на калибровочном образце с толщиной покрытия, равной d . Обе фазы измеряются при одном и том же значении частоты f_i .

С учетом всех найденных значений $\Delta\varphi_2$ необходимо построить зависимость $\Delta\varphi_2$ от f в интервале частот от f_h до f_1 , подобную приведенной на рис. 3. Она является основой для определения толщины покрытий на подлежащих впоследствии контролю изделиях.

Рассмотрим, как на основе полученной при измерениях на калибровочных образцах зависимости $\Delta\varphi_2$ от f определить толщину покрытия на подлежащем контролю изделии. Если при $f=f_h$ фаза φ , измеренная на покрытии контролируемого изделия, имеет величину φ_{hk} (то есть такую же, как у калибровочных образцов, с учетом погрешности измерений), то зависимость $\Delta\varphi_2$ от f , полученную на калибровочных образцах, можно использовать для определения толщины покрытия на этом изделии. Для этого необходимо, как и ранее, при уменьшении f от f_h до f_1 произвести при определенных дискретных значениях f_i измерения фазы φ_s , после чего по выражению $\Delta\varphi_2 = |\varphi_{d\max}| - |\varphi_s|$ найти величину $\Delta\varphi_2$. Затем, построив зависимость $\Delta\varphi_2$ от f в интервале от f_h до f_1 , следует определить частоту f_s , при которой $\Delta\varphi_2$ начинает возрастать от нулевого значения в процессе уменьшения f от величины f_h (например, как в точке c на рис. 3). Зная величину f_s , по зависимости $\Delta\varphi_2$ от f , полученной с калибровочных образцов, можно определить толщину покрытия на контролируемом изделии.

Если же при $f=f_h$ фаза φ , измеренная на поверхности контролируемого изделия, отличается от φ_{hk} и равна φ_{hs} , то это означает, что удельная электропроводность σ_{1s} покрытия изделия отличается от σ_1 покрытия калибровочных образцов. Отметим, что вариации величины электропроводности покрытия, изготовленного из одного и того же материала, часто наблюдаются на практике. Измерения на образцах, у которых на никелевое основание нанесен слой хрома, показали, что если, например, абсолютное значение разности $\varphi_{hk} - \varphi_{hs}$ равно 1° , то в ходе последующих измерений при более низких f это значение разности фаз, измеренных на калибровочных и контролируемых образцах, сохраняется равным 1° до такой частоты, при которой на формирование φ начнут оказывать влияние электромагнитные параметры подложки. Следовательно, определив для контролируемого изделия, как и прежде, зависимость $\Delta\varphi_2$ от f при уменьшении f от f_h до f_1 , получим зависимость, сходную по характеру с показанной на рис. 3. Но теперь для определения d нельзя использовать полученную ранее на калибровочных образцах зависимость $\Delta\varphi_2$ от f ввиду того, что $\sigma_{1s} \neq \sigma_1$. Для определения d в этом случае необходимо иметь дополнительный калибровочный образец, у которого известна толщина d_k покрытия, а удельная электропроводность покрытия равна σ_{1s} .

Для такого дополнительного калибровочного образца также необходимо определить зависимость $\Delta\varphi_2$ от f при уменьшении f от f_h до f_1 . Обозначим теперь приращение $\Delta\varphi_2$ как $\Delta\varphi_{2k}$. Оно определяется выражением $\Delta\varphi_{2k} = |\varphi_{d\max}| - |\varphi_{dk}|$, где φ_{dk} – фаза, измеренная на дополнительном калибровочном образце. По полученной зависимости $\Delta\varphi_{2k}$ от f определяем, при какой частоте f_k электромагнитные параметры подложки дополнительного калибровочного образца начинают оказывать влияние на формирование φ , то есть когда начинается рост $\Delta\varphi_{2k}$ относительно величины, определенной при $f=f_h$. По зависимости $\Delta\varphi_2$ от f , полученной ранее с набора калибровочных образцов, устанавливаем, какая толщина d_{er} соответствовала бы частоте f_k , если бы удельная электропроводность покрытия равнялась σ_1 . Однако в действительности $\sigma_{1s} \neq \sigma_1$, поэтому определенная вспомогательная величина d_{er} отлична от известного значения d_k дополнительного калибровочного образца. Определим поправочный коэффициент k как $k = d_k/d_{er}$.

В результате для определения толщины покрытия на изделии, у которого удельная электропроводность σ_{1s} материала покрытия отличается от σ_1 калибровочных образцов (при одинаковых материалах покрытия и основания у изделия и калибровочных образцов), необходимо, как и ранее, при уменьшении f от f_h до f_1 произвести при определенных дискретных значениях f_i измерения фазы φ_s , после чего по выражению $\Delta\varphi_2 = |\varphi_{d\max}| - |\varphi_s|$ найти величину $\Delta\varphi_2$. Затем, построив зависимость $\Delta\varphi_2$ от f в интервале от f_h до f_1 , следует определить частоту f_s , при которой $\Delta\varphi_2$ начинает возрастать относительно того значения, которое было при $f=f_h$ в процессе уменьшения f от максимального значения f_h . Теперь, зная величину f_s , по зависимости $\Delta\varphi_2$ от f , полученной с калибровочных образцов, следует определить вспомогательное значение толщины d_{er} . Действительная толщина покрытия d на контролируемом изделии определится из выражения $d = k \cdot d_{er}$.

Заклучение. В ходе проведенных исследований нами установлено, что уменьшить влияние вариаций удельной электрической проводимости материала покрытия и электромагнитных параметров материала подложки двуслойного изделия на точность определения толщины этого покрытия вихретоковым толщиномером, использующим фазовый способ контроля, можно, проводя измерения при различных дискретных частотах тока возбуждения накладного преобразователя. Интервал используемых частот определяется электромагнитными параметрами материалов покрытия и подложки, а также диапазоном возможных толщин покрытия.

Сначала, при относительно высокой частоте получают информацию только об электропроводности покрытия контролируемого образца или изделия. Затем, понижая частоту и проводя при определенных фиксированных ее значениях измерения фазы, вносимой в преобразователь ЭДС, определяют частоту, при которой вклад в формирование фазы начинают вносить электромагнитные параметры материала подложки. Сопоставляя полученные результаты с аналогичными зависимостями, полученными предварительно при измерениях на наборе калибровочных образцов с известными толщинами покрытий, определяют толщину покрытия на исследуемом образце или изделии.

Приведен пример определения калибровочной зависимости, полученной при измерениях на калибровочных образцах, у которых на никелевую подложку нанесено покрытие из хрома. При такой методике определения толщины проводящего покрытия удается за счет учета вариации удельной электрической проводимости покрытия и сведения к минимуму влияния вариаций электромагнитных параметров подложки на фазу вносимой в преобразователь ЭДС повысить точность измерения толщины покрытия вихретоковым толщиномером.

Список использованных источников

1. Рубин, А. Л. Реакция ферромагнитного полупространства с немагнитным слоем на датчик накладного типа / А. Л. Рубин, В. Г. Пахомов // Дефектоскопия. – 1974. – № 3. – С. 36–40.
2. Ноймайер, П. Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий / П. Ноймайер // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 2 (40). – С. 29–30.
3. Бакунов, А. С. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий / А. С. Бакунов, В. А. Калосин // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 1 (211). – С. 27–31.
4. Дорофеев, А. Л. Индукционная толщинометрия / А. Л. Дорофеев, А. И. Никитин, А. Л. Рубин. – М.: Металлургия, 1978. – 184 с.
5. Сясько, В. А. Измерение толщины напыляемых никелевых покрытий на крупногабаритных чугунных изделиях / В. А. Сясько // Зап. Горн. ин-та. – 2016. – Т. 221. – С. 712–716.
6. Дорофеев, А. Л. Индукционная структуроскопия / А. Л. Дорофеев. – М.: Энергия, 1973. – 176 с.
7. Кудрявцева, О. В. Техническая гальванопластика / О. В. Кудрявцева. – СПб.: Политехника, 2010. – 148 с.
8. Петрова, Л. Г. Электротехнические материалы / Л. Г. Петрова, М. А. Потапов, О. В. Чудина. – М.: МАДИ (ГТУ), 2008. – 198 с.
9. García-Martín, J. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing / J. García-Martín, J. Gómez-Gil, E. Vázquez-Sánchez // Sensors. – 2011. – Vol. 11. – P. 2525–2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>

References

1. Rubin A. L., Pahomov V. G. Reaction of a ferromagnetic half-space with a non-magnetic layer on superimpose transducer. *Defektoskopija = Russian Journal of Nondestructive Testing*, 1974, no. 3, pp. 36–40 (in Russian).
2. Neumaier P. Eddy current phase method for measuring the thickness of galvanic coatings. *V mire nerazrushayushchego kontrolya = NDT World*, 2008, no. 2 (40), pp. 29–30 (in Russian).
3. Bakunov A. S. Development of eddy current thickness measurement of coatings. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*, 2016, no. 1, pp. 27–31. <https://doi.org/10.14489/td.2016.01.pp.027-031> (in Russian).
4. Dorofeev A. L. *Induction thickness measurement*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 184 p. (in Russian).
5. Sjas'ko V. A. Measurement of the thickness of the sprayed nickel coatings on large-sized cast iron products. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2016, vol. 221, pp. 712–716. <http://dx.doi.org/10.18454/pmi.2016.5.712> (in Russian).
6. Dorofeev A. L. *Induction Structuroscopy*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 176 p. (in Russian).
7. Kudrjavceva O. V. *Technical Electroforming*. Saint Petersburg, Polytechnic Publ., 2010. 148 p. (in Russian).
8. Petrova L. G., Potapov M. A., Chudina O. V. *Electrotechnical Materials*. Moscow, Moskow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), 2008. 198 p. (in Russian).
9. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*, 2011, vol. 11, pp. 2525–2565. <https://doi.org/10.3390/s110302525>

Информация об авторах

Чернышев Алексей Всеволодович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Загорский Иван Евгеньевич – старший научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Шарандо Владимир Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sharando@iaph.bas-net.by

Information about the authors

Alexey V. Chernyshev – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Ivan E. Zagorskiy – Senior Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Vladimir I. Sharando – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sharando@iaph.bas-net.by