УДК 620.179.14

Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы накладного преобразователя вихретокового толщиномера

Чернышев А.В.

*Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь*

*Поступила 14.12.2016
Принята к печати 09.02.2017*

При вихретоковой толщинометрии электропроводящих двухслойных структур одним из мешающих факторов является наличие вариаций величины удельной электрической проводимости материала верхнего слоя (покрытия) при перемещении от точки к точке по поверхности объекта контроля или при переходе от одного объекта контроля к другому. Целью настоящей работы являлась оценка погрешности определения толщины проводящего покрытия, расположенного на проводящем ферромагнитном основании, при фазовом способе вихретокового контроля с помощью накладного преобразователя. Причиной погрешности являлись вариации величины удельной электрической проводимости материала покрытия.

Оценка погрешности проводилась на основе расчетов фазы вносимой в накладной преобразователь эдс по известным аналитическим выражениям для витка с током синусоидальной формы, расположенного над бесконечным полупространством с покрытием в виде тонкого слоя на его поверхности. Выбранные при расчетах электромагнитные параметры покрытия и основания примерно соответствуют случаю - слой хрома на никелевом основании. Расчеты проведены при различных частотах пропускаемого через виток тока.

Показано, что по мере уменьшения частоты проходящего через виток тока указанная погрешность уменьшается. Значение минимально возможной рабочей частоты тока возбуждения определяется условием отсутствия влияния на фазу вносимой в накладной преобразователь эдс вариаций толщины основания.

Для уменьшения указанной погрешности предложено определять, на основе фазового способа, при относительно высокой частоте тока возбуждения преобразователя удельную электропроводность материала покрытия. После этого, при более низкой частоте тока возбуждения, также при помощи фазового способа, определяется толщина покрытия, при этом учитывается определенная ранее величина удельной электропроводности покрытия. Также рассмотрены способы повышения точности фазовых измерений в мегагерцовой области частот тока возбуждения.

Ключевые слова: вихретоковая толщинометрия, накладной преобразователь, расчет, погрешность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Адрес для переписки:
*Чернышев А.В.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by*

Address for correspondence:
*Chernyshev A.V.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by*

Для цитирования:
Чернышев А.В.
Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы накладного преобразователя вихретокового толщиномера.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 1. – С. 32–39.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

For citation:
Chernyshev A.V.
[Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer sample on of phase introduced electromotive force of superimposed transducer of eddy current thickness meter].
Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017, vol. 8, no. 1, pp. 32–39 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer sample on of phase introduced electromotive force of superimposed transducer of eddy current thickness meter

Chernyshev A.V.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus

Received 14.12.2016
Accepted for publication 09.02.2017

Abstract

In carrying out eddy current thickness measurement of two-layer conductive objects one from the interfering factors is the presence of variations in the value of the electrical conductivity of the material of the upper layer (coating) when moving from point to point on the surface of object of control or when passing from one object of control to another. The aim of this work is to evaluate the accuracy of determining the thickness of the conductive coating disposed on a conducting ferromagnetic basis, using the phase method of eddy current testing. The reason of the error is variation of the electrical conductivity of the material of coating.

Determination of the error is based on calculations using known analytical expressions for the loop with current of sinusoidal form arranged over the infinite half space with a covering as a thin layer. Selected in calculating electromagnetic parameters of coating and substrate approximately correspond to the case -chromium layer on a nickel base. Calculations are performed for different frequencies of current passed through coil.

It is shown that at reduction of frequency of the current passes through the coil the error is reduced. The value of the lowest possible operating frequency of the excitation current is determined by the condition of absence influence on the phase introduced into the superimposed transducer emf variations in the thickness of the basis.

To reduce the indicated error it is proposed to determine, on the basis of phase method at a relatively high frequency transducer current excitation, conductivity of the material of coating. After this, at a low frequency excitation current and using phase method, the coating thickness is determined, taking into consideration the previously determined value of the conductivity of coating. Also discussed ways to improve the accuracy of phase measurements in the MHz region of the excitation current frequency.

Keywords: eddy current, thickness measurement, superimposed transducer, calculation, error.

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Адрес для переписки:
Чернышев А.В.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:
Chernyshev A.V.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Для цитирования:
Чернышев А.В.
Влияние вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного образца на фазу вносимой электродвижущей силы накладного преобразователя вихретокового толщиномера.
Приборы и методы измерений.
2017. – Т. 8, № 1. – С. 32–39.
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

For citation:
Chernyshev A.V.
[Influence of variations of the conductivity of upper layer of two-layer sample on of phase introduced electromotive force of superimposed transducer of eddy current thickness meter].
Pribory i metody izmerenii [Devices and Methods of Measurements].
2017, vol. 8, no. 1, pp. 32–39 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-1-32-39

Введение

При вихретоковой толщинометрии двухслойной структуры, состоящей из проводящего верхнего слоя (покрытия), расположенного на проводящем ферромагнитном основании (подложке), эффективным является контроль, основанный на измерениях фазы φ вносимой в накладной преобразователь эдс [1]. По ее значению определяют толщину верхнего слоя *d*. В качестве накладного преобразователя обычно используется трехобмоточный трансформаторный преобразователь. Он содержит обмотку, создающую поле возбуждения, а также измерительную и компенсационную обмотки. Часто все обмотки располагаются на ферритовом сердечнике. Отсчет фазы φ ведется относительно тока возбуждения преобразователя, изменяющегося по гармоническому закону, в [2] для повышения точности измерений в качестве опорного сигнала предложено использовать эдс, наводимую в компенсационной обмотке преобразователя. Фаза вносимой в измерительную обмотку эдс зависит от геометрических параметров преобразователя, частоты *f* тока возбуждения, 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.

На практике обычно наблюдаются вариации величины σ_1 при перемещении от точки к точке по поверхности ОК, при переходе от одного ОК к другому. Это приводит к вариациям величины φ при неизменном значении толщины покрытия *d*, что вызывает погрешность при определении *d*. При этом амплитудная, фазовая, амплитудно-фазовая отстройка от влияния вариаций σ_1 на результаты измерений *d* практически невозможны [3]. Уменьшить влияние вариаций σ_1 на показания вихретокового толщиномера можно путем понижения частоты *f* тока возбуждения преобразователя, однако в этом случае мешающими факторами могут стать вариации толщины подложки и магнитной проницаемости ее материала. В результате при малой толщине подложки приходится выбирать относительно высокую рабочую частоту *f* толщиномера и применять при этом способ отстройки от влияния вариаций величины σ_1 на результаты измерений *d*. Таким способом является определение величины σ_1 на основе измерения амплитуды *A* или (и) фазы φ вносимой в накладной преобразователь эдс при такой относительно высокой частоте поля возбуждения *f*, при которой на результаты измерений не оказывают влияния электромагнитные параметры подложки. После этого измерения φ или (и) *A* вносимой эдс производятся при более низкой частоте *f*, когда измеряемые параметры содержит информацию о толщине покрытия *d*. При этом при анализе результатов измерения φ или (и) *A* с целью определения значения *d* учитывается найденное значение σ_1. Пример реализации такого способа контроля приведен в [4].

Отметим, что в известных вихретоковых толщиномерах, таких как «Константа», ТЛ-1МП, ТМ-4, ВТ-46НМ при относительно высокой рабочей частоте *f* отстройка от вариаций величины удельной электропроводности покрытия не предусмотрена.

Целью настоящей работы являлась оценка погрешности определения толщины проводящего покрытия, расположенного на проводящем ферромагнитном основании, при фазовом способе вихретокового контроля с помощью накладного преобразователя, возникающей из-за вариаций величины удельной электрической проводимости материала покрытия, а также рекомендации по уменьшению такой погрешности.

Результаты численных расчетов

В статье приведены результаты расчетов зависимости фазы φ вносимой в накладной преобразователь эдс от толщины покрытия *d*, полученные при различных значениях удельной электропроводности покрытия σ_1 и при различных *f*. Расчеты проведены по известным аналитическим выражениям, приведенным, например, в работе [5]. Расчет проведен для преобразователя в виде двух витков – создающего электромагнитное поле возбуждения, и измерительного – расположенных над проводящим ферромагнитным полупространством, на поверхности которого имеется проводящее покрытие. Схема расположения витков над двухслойным ОК показана на рисунке 1. Методика расчета подобна примененной в работе [6]. Сначала приняты следующие электромагнитные параметры материалов покрытия и подложки – σ_1 = 5,291 МСм/м (что примерно соответствует электропроводности хрома, приводимой в справочной литературе; обозначим данное численное значение как σ_{10}) , σ_2 = 11,5 МСм/м и μ_2 = 100, что примерно соответствует электропроводности и относительной магнитной про-

ницаемости никеля. Амплитудное значение тока возбуждения принято равным 1 А, радиусы R обоих витков одинаковы и равны 0,002 м, расстояние h от витка, создающего поле возбуждения, до поверхности полупространства составляет 0,001 м, измерительный виток расположен посередине этого расстояния. Расчеты проведены при различных значениях f.

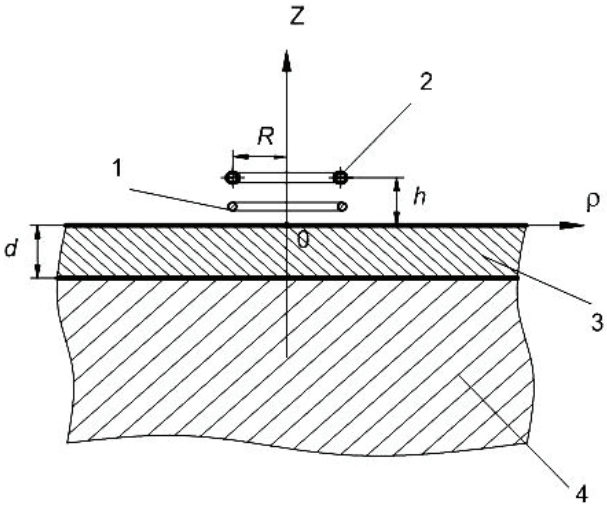

Рисунок 1 – Витки над проводящей двухслойной средой: 1 – измерительный виток; 2 – виток, создающий электромагнитное поле возбуждения; 3 – проводящее покрытие; 4 – проводящая магнитная подложка

Figure 1 – The coils above the conducting two-layer medium: 1 – measuring coil; 2 – coil creates an electromagnetic excitation field; 3 – conductive coating; 4 – magnetic conducting substrate

Результаты расчетов, полученные при f = 300 кГц, представлены на рисунке 2 линией 1. (При такой частоте глубина проникновения δ_S плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 400 мкм.) При этом по вертикальной координатной оси отложены не значения φ, а абсолютная величина разности фаз $\varphi - \varphi_{Cu}$, где φ_{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 Δφ. Цифрой 2 на рисунке 2 обозначена зависимость Δφ от d, полученная при значении σ_1 , превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – при σ_1 меньшей σ_{10} на 20 %.

Рассмотрим, как вариации величины σ_1 сказываются на погрешности определения толщины покрытия d, определяемой по значениям Δφ. Предположим, что зависимость Δφ от d , представленная линией 1 на рисунке 2, используется в вихретоковом толщиномере в качестве калибровочной, т.е. на основании измерения значения Δφ определяется толщина покрытия d. Основываясь на данных, приведенных на рисунке 2, определим, к какой относительной погрешности δ_d определения d при помощи этого толщиномера приведут вариации величины σ_1 на ± 20 % относительно значения σ_{10}. Анализ расчетных данных показывает, что в области толщин около 50 мкм максимальная относительная погрешность δ_d определения толщины покрытия составляет 31,7 %, в области толщин около 450 мкм значение δ_d равно 33 %.

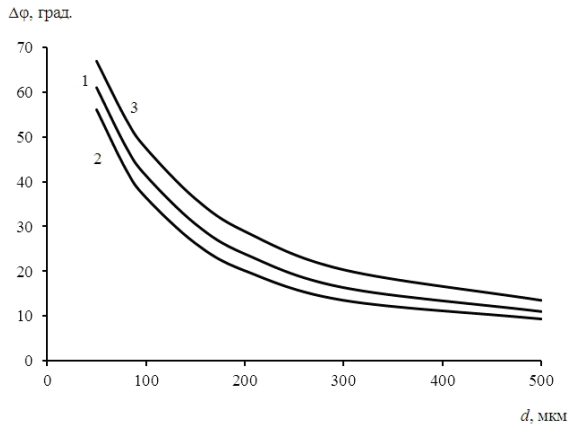

Рисунок 2 – Зависимость Δφ от d при f = 300 кГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Figure 2 – Dependence of Δφ on d at f = 300 kHz: 1 – σ_1 = 5,291 MS/m; 2 – σ_1 = 6,3492 MS/m; 3 – σ_1 = 4,2328 MS/m

Далее рассмотрим зависимость Δφ от d, рассчитанную при более низкой частоте f = 30 кГц и при прежних параметрах преобразователя и образца. (В этом случае глубина проникновения δ_S плоской электромагнитной волны в материал покрытия составляет 1,26 мм). При $\sigma_1 = \sigma_{10}$ = 5,291 МСм/м зависимость Δφ от d представлена линией 1 на рисунке 3. Как и на рисунке 2, цифрой 2 на рисунке 3 обозначена зависимость, полученная при значении σ_1, превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине σ_1, меньшей σ_{10} на 20 %. Из рисунка 3 видно, что при данной частоте поля возбуждения зависимость Δφ от d ближе к линейной, чем в предыдущем случае. Анализ приведенных на рисунке 3 данных показывает, что в области толщин около 50 мкм максимальная относительная погрешность δ_d, возникающая при отклонениях величины σ_1 на ± 20 % относительно σ_{10}, равна 22 %. В области толщин около 450 мкм в таком случае мак-

симальное значение δ_d = 17 %. Из этих данных можно сделать вывод, что по мере понижения *f* величина относительной погрешности δ_d, вызванная изменением значения σ_1 относительно σ_{10} на одну и ту же величину, уменьшается. Например, при еще более низкой частоте *f* = 3 кГц вариации σ_1 относительно σ_{10} на ± 20 % приводят к δ_d = 6,6 % в области толщин покрытия около 50 мкм и к δ_d = 8,6 % в области толщин около 500 мкм. Это объясняется тем, что по мере уменьшения *f* возрастает вклад в формирование вносимой эдс измерительного витка вихревых токов, возбуждаемых в подложке, электромагнитные параметры которой считаются неизменными.

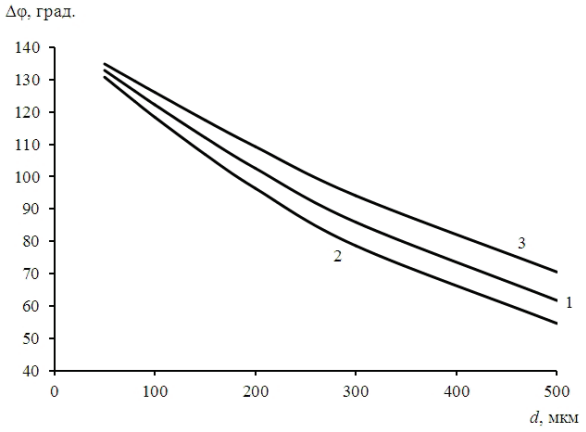

Рисунок 3 – Зависимость Δφ от *d* при *f* = 30 кГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Figure 3 – Dependence of Δφ on *d* at *f* = 30 kHz: 1 – σ_1 = 5,291 MS/m; 2 – σ_1 = 6,3492 MS/m; 3 – σ_1 = 4,2328 MS/m

Из приведенных данных следует, что для уменьшения относительной погрешности δ_d определения толщины покрытия, вызванной вариациями величины σ_1, необходимо определять значение σ_1 при относительно высокой частоте *f* с целью ее последующего учета при анализе результатов измерения фазы φ вносимой эдс преобразователя (с целью определения по значению φ величины *d*) при более низкой рабочей частоте *f* толщиномера. Известные в настоящее время вихретоковые измерители удельной электрической проводимости металлов, такие как «Константа», ВЭ-26НП, ВЭ-27НЦ могут работать лишь с ОК, толщина которых превышает 300 мкм. Для определения удельной электропроводности более тонких покрытий необходимо проводить измерения при относительно высокой рабочей частоте *f* вихретокового толщиномера.

На рисунке 4 приведены результаты расчета зависимостей Δφ от *d*, полученные при *f* = 5,8 МГц и прежних параметрах преобразователя и образца. Как на рисунках 2 и 3, цифрой 2 на рисунке 4 обозначена зависимость, полученная при значении σ_1, превышающем σ_{10} на 20 %, а цифрой 3 – зависимость, полученная при величине σ_1, меньшей σ_{10} на 20 %, цифрой 1 обозначена зависимость, полученная при $\sigma_1 = \sigma_{10}$. Из рисунка 4 следует, что при данной относительно высокой частоте *f* отсутствует зависимость Δφ 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 в данной работе материала с σ_{10} = 5,291 МСм/м значение δ_S = 91 мкм.) При *d* > 200 мкм, как следует из рисунка 4, увеличение σ_1 относительно значения σ_{10} на 20 % приводит к уменьшению Δφ на 12 % относительно того значения, которое имеет место при $\sigma_1 = \sigma_{10}$. Уменьшение же σ_1 относительно σ_{10} на 20 % приводит соответственно к увеличению Δφ на 18%. Из приведенных данных следует, что при относительно высокой частоте поля возбуждения *f* по измерениям величины φ можно определять значение удельной электропроводности материала покрытия σ_1. Далее будет рассмотрено, с какими техническими трудностями связано измерение φ при нахождении *f* в мегагерцовом диапазоне частот.

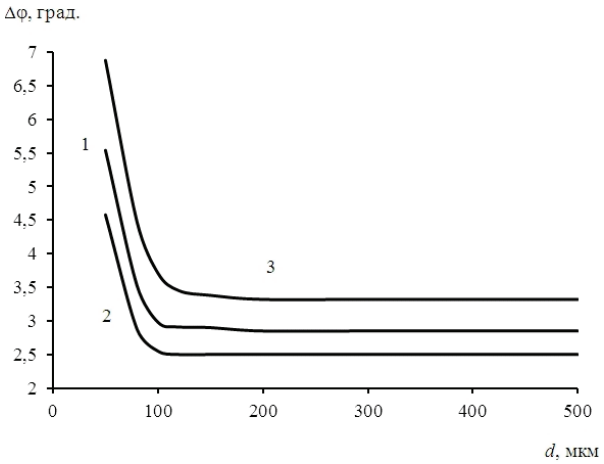

Рисунок 4 – Зависимость Δφ от *d* при *f* = 5,8 МГц: 1 – σ_1 = 5,291 МСм/м; 2 – σ_1 = 6,3492 МСм/м; 3 – σ_1 = 4,2328 МСм/м

Figure 4 – Dependence of Δφ on *d* at *f* = 5,8 MHz: 1 – σ_1 = 5,291 MS/m; 2 – σ_1 = 6,3492 MS/m; 3 – σ_1 = 4,2328 MS/m

Методика измерения толщины покрытия при учете электропроводности материала покрытия

Перед проведением измерений необходимо знать примерное значение минимально возможной толщины покрытия d_{min}, которая может быть у подлежащих контролю изделий. Определив каким-либо способом наиболее вероятное значение удельной электропроводности σ_{10} материала покрытия, необходимо найти частоту f плоской электромагнитной волны, при которой глубина ее проникновения δ_S в такой материал будет примерно в 2,5 раза меньше значения d_{min}. Это объясняется тем, что максимальная глубина (от поверхности ОК) с которой может быть получена информация об электромагнитных параметрах проводящего материала при проникновении в него плоской электромагнитной волны, примерно равна $3\delta_S$. Кроме этого, при применении накладного преобразователя реальная глубина проникновения может быть меньше, чем δ_S, из-за неоднородного распределения в пространстве амплитуды напряженности магнитного поля возбуждения накладного преобразователя, данный вопрос рассмотрен в работе [6]. Например, из рисунка 4 следует, что для образцов с $d \geq 200$ мкм и $\sigma_1 = \sigma_{10} = 5{,}291$ МСм/м (и с учетом возможности присутствия образцов с $\sigma_1 = \sigma_{10} - 0{,}2\sigma_{10}$) при $f = 5{,}8$ МГц, обозначим ее как f_H, можно проводить измерения σ_1. При этом на результаты измерений не будут оказывать влияния электромагнитные параметры подложки (т.е. нет зависимости φ от d). Для определения величины σ_1 по результатам измерения φ необходимо провести калибровку толщиномера – определить соответствие между значениями φ от σ_1 при рабочей частоте f_H. Такое соответствие может быть определено на основе экспериментальных измерений величин φ на наборе образцов с известными значениями удельной электропроводности их материала или на основе численных расчетов. Возможные способы такого расчета приведены, например, в работах [5, 7] (для накладного преобразователя без ферритового сердечника).

После этого выбирается более низкая, чем f_H, рабочая частота толщиномера, при которой обеспечивается контроль толщин покрытия в ожидаемом интервале их возможных значений, обозначим эту частоту как f_L. При рабочей частоте, равной f_L, фаза φ зависит как от σ_1, так и от d. При этой частоте проводится измерение фазы φ вносимой в измерительную катушку накладного преобразователя эдс при его установке на ОК. После этого из определенных предварительно зависимостей φ от d (т.е. имеющих вид, подобный показанным на рисунках 2 и 3) выбирается та, которая соответствует определенной при $f = f_H$ величине удельной электропроводности σ_1 материала покрытия. По этой калибровочной зависимости определяется величина d на основе измеренного значения φ. Предварительный расчет зависимостей φ от d проводится по одному из способов, приведенных в тех же работах [5, 7]. Зависимости φ от d могут быть определены на основе экспериментальных измерений при наличии набора образцов с известными различными толщинами покрытий и различными величинами электропроводности материала покрытия.

Рабочая частота f_L выбирается по возможности низкой, но такой, чтобы на результаты измерений φ не сказывались возможные вариации толщины основания.

Погрешность измерений

Сначала оценим, с какой минимальной относительной погрешностью можно определять величину удельной электропроводности σ_1 материала покрытия, основываясь на измерениях фазы φ вносимой в измерительную катушку преобразователя эдс при частоте поля возбуждения $f_H = 5{,}8$ МГц. Как видно из рисунка 4, в этом случае при $d \geq 200$ мкм увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приводит к изменению Δφ (и, соответственно, φ) на 0,35°. Обозначим такое изменение φ наблюдаемое при изменении σ_1, как $D(\varphi_{\Delta\sigma})$, оно определяется выражением

$$D(\varphi_{\Delta\sigma}) = |\varphi(\sigma_{10}) - \varphi(\sigma_1)|,$$

где $\varphi(\sigma_{10})$ – фаза вносимой эдс при удельной электропроводности материала покрытия σ_1, равной σ_{10}; $\varphi(\sigma_1)$ – фаза вносимой эдс при σ_1, равном в данном случае $\sigma_{10} + 0{,}2\,\sigma_{10}$. Если же такие измерения провести при $f_H = 300$ кГц (на образцах с такой толщиной покрытия d, при которой электромагнитные параметры подложки не сказываются на результатах измерений), то увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приведет к большему изменению фазы φ – значение $D(\varphi_{\Delta\sigma})$ составит в этом случае 0,86°. Следовательно, по мере повышения частоты поля возбуждения f уменьшается величина изменения фазы $D(\varphi_{\Delta\sigma})$, происходящая при

изменении σ_1 на одну и ту же величину $\Delta\sigma_1$ относительно некоторого первоначального значения σ_{10}. Это можно представить как уменьшение чувствительности фазы φ к изменениям значения σ_1 по мере роста f (понимая под чувствительностью величину $D(\varphi_{\Delta\sigma})/\Delta\sigma_1$). Именно этот фактор является главной трудностью при определении удельной электропроводности тонких слоев. Данный результат соответствует известному положению о том, что по мере роста величины обобщенного параметра β, определяемого как $\beta = R\sqrt{\omega\mu_0\sigma_1}$ (где μ_0 – магнитная постоянная, равная $4\pi10^{-7}$ Гн/м; ω – угловая частота поля возбуждения), фаза вносимой в накладной преобразователь эдс, расположенный над проводящим немагнитным полупространством, приближается к предельному значению $-\pi/2$ [8].

Известно, что повысить чувствительность изменений амплитуды и фазы вносимой в накладной преобразователь эдс к изменениям величин σ_1 и d можно включением обмоток преобразователя в состав резонансного контура [9]. Однако при этом возникают трудности с обеспечением температурной стабильности амплитуды и фазы выходной эдс преобразователя (из-за температурных нестабильностей: а) магнитной проницаемости материала ферритового сердечника преобразователя; б) сопротивления обмоток преобразователя; в) емкости конденсаторов резонансного контура), увеличивается чувствительность фазы к вариациям зазора между преобразователем и ОК. При использовании резонансной схемы включения накладного преобразователя с ферритовым сердечником усложняются расчеты значений амплитуды и фазы его выходной эдс [10] по сравнению со случаем преобразователя без сердечника и без использования резонанса.

Повысить точность измерения фазы вносимой в накладной преобразователь эдс в мегагерцовом частотном диапазоне можно следующим образом: а) использовать в качестве опорного сигнала фазометра напряжение со специальной дополнительной обмотки преобразователя; б) расположить микросхемы предварительного усилителя и фазометра непосредственно возле обмоток преобразователя для исключения присутствия соединительного кабеля между ними; в) повышать точность фазометра в мегагерцовой области частот посредством использования современных высокочастотных микросхем, специально разработанных для фазовых измерений. Например, нами разработан фазометр, который в диапазоне частот от 1 МГц до 6 МГц измеряет фазу с абсолютной погрешностью ± 0,05°.

Как было показано выше, при f = 5,8 МГц для образцов с толщиной покрытия большей 200 мкм увеличение σ_1 на 20 % относительно значения σ_{10} приводит к изменению фазы $D(\varphi_{\Delta\sigma})$ на 0,35° (см. рисунок 4). Следовательно, изменение фазы φ на 0,05° (т.е. это абсолютная погрешность измерения нашим фазометром), соответствует изменению σ_1 на 2,85 % относительно σ_{10}. (Так как увеличение σ_1 на 20 % относительно σ_{10} приводит к изменению φ на 0,35°, то изменению φ на 0,05° соответствует изменение σ_1 на 2,85 %.) Таким образом, в этом случае погрешность измерения изменений величины σ_1 относительно σ_{10} составляет 2,85 %.

Теперь рассмотрим, к какой относительной погрешности δ_d определения толщины покрытия приведет наличие указанной погрешности (т.е. 2,85 %) определения σ_1, например, при рабочей частоте f_L = 30 кГц. Ранее было показано, что в этом случае изменение σ_1 на 20 % относительно значения σ_{10} приводит к возникновению максимальной относительной погрешности δ_d, в области толщин порядка 450 мкм, равной 17 %. В случае же изменения σ_1, относительно σ_{10} , на величину погрешности 2,85 %, как показывает расчет, относительная погрешность δ_d при определении величины d составит 2,4 % (в той же области толщин порядка 450 мкм). Следовательно, провести измерения d с меньшей относительной погрешностью, при наличии указанной погрешности измерения σ_1, невозможно.

Заключение

Расчетами на основе использования известных аналитических выражений найдена относительная погрешность определения толщины проводящего покрытия, расположенного на ферромагнитном проводящем основании, вызванная вариациями удельной электропроводности σ_1 материала покрытия при фазовом способе вихретоковой толщинометрии. Расчеты проведены при разных частотах поля возбуждения накладного преобразователя. Уменьшить такую погрешность можно путем определения значения удельной электропроводности σ_1 материала покрытия (на основе измерения фазы вносимой в накладной преобразователь эдс) при такой относительно высокой частоте поля возбуждения преобразователя, при которой электромагнитные параметры

основания не оказывают влияния на формирование фазы вносимой в накладной преобразователь эдс. После этого измерения фазы φ вносимой эдс производятся при более низкой рабочей частоте преобразователя и по калибровочной зависимости фазы φ вносимой эдс от толщины покрытия *d*, взятой с учетом определенного значения удельной электропроводности σ_1 материала покрытия, определяется толщина покрытия *d*. Зависимости фазы φ вносимой эдс от толщины покрытия *d* при различных величинах удельной электропроводности σ_1 материала покрытия должны быть предварительно установлены на основе расчетных или экспериментальных данных.

Для уменьшения погрешности измерения фазы в мегагерцовом диапазоне частот поля возбуждения преобразователя рекомендуется использовать в качестве опорного сигнала фазометра напряжение, получаемое с дополнительной обмотки накладного преобразователя, располагать микросхемы предварительного усилителя и фазометра непосредственно возле обмоток преобразователя, максимально возможно повышать точность фазометра.

Список использованных источников

1. Ноймайер, П. Вихретоковый фазовый метод измерения толщины гальванических покрытий / П. Ноймайер // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – № 2 (40). – С. 29–30.

2. Вихретоковый измеритель: пат. Российской Федерации, МПК7 G01N 27/90 / В.А. Сясько, А.С. Булатов, М.Ю. Коротеев, П.В. Соломенчук; заявитель ЗАО «Константа». – № 2384839; заявл. 13.10.2008; опубл. 20.03.2011 // Бюл. изобр. – 2011. – № 8.

3. Бакунов, А.С. Развитие вихретоковой толщинометрии защитных покрытий / А.С. Бакунов, В.А. Калошин // Контроль. Диагностика. – 2016. – №1 (211). – С. 27–31.

4. Вихретоковый способ двухчастотного контроля изделий: пат. Российской Федерации, МПК7 G01B 7/06 / Н.Г. Богданов, В.А. Приходько, А.И. Суздальцев; заявитель Орловский государственный техн. унив. – № 2184931; заявл. 03.02.2000; опубл. 10.07.2002 // Бюл. изобр. – 2002. – № 19.

5. Герасимов, В.Г. Электромагнитный контроль / В.Г. Герасимов, А.Д. Покровский, В.В. Сухоруков. – Кн. 3. – М.: Высш. шк., 1992. – 312 с.

6. Чернышев, А.В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем / А.В. Чернышев // Приборы и методы измерений. – 2014. -№ 1 (8). – С. 73 – 77.

7. Li, Y. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens / Y. Li, T. Theodoulidis, G. YunTian // IEEETrans. Magn. – 2007. – V. 43. – P. 4010–4015.

8. Клюев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др. – М.: Машиностроение, 2003. – 656 с.

9. Баженов, И.Н. Способ двухпараметрического контроля толщины немагнитных металлических покрытий / И.Н. Баженов, Ю.Б. Иванов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – № 3. – С. 127–132.

10. May, P. Numerical modeling and implementation of ferrite cored eddy current probes/ P. May, E. Zhou, D. Morton // NDT&E Internat. – 2007. – V. 40. – P. 566-576.

References

1. Nojmajer P. [Eddy current phase method of measuring the thickness of galvanic coatings]. *V mire nerazrushajushhego kontrolja* [In the world of non-destructive testing], 2008, no. 2 (40), pp. 29–30 (in Russian).

2. Sjas'ko V.A., Bulatov A.S., Koroteev M.Ju., Solomenchuk P.V. *Vihretokovyj izmeritel'* [Eddy Current meter]. Patent RF, no. 2384839, 2011.

3. Bakunov A.S., Kaloshin V.A. [Development of the eddy current thickness measurement of coatings]. *Kontrol'. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2016, no. 1 (211), pp. 27–31 (in Russian).

4. Bogdanov N.G., Prihod'ko V.A., Suzdal'cev A.I. *Vihretokovyj sposob dvuhchastotnogo kontrolja izdelij* [Eddy current method of dual frequency control of products]. Patent RF, no. 2184931, 2002.

5. Gerasimov V.G., Pokrovskij A.D., Suhorukov V.V. *Jelektromagnitnyj kontrol'* [Electromagnetic control]. Moscow, Vysshaja shkola Publ., 1992. Book 3, 312 p.

6. Chernyshev A.V. [Selection of the operating frequency of eddy current thickness gauge with superimposed transducer]. *Pribory i metody izmerenij* [Devices and methods of measurements], 2014, no. 1 (8), pp. 73–77 (in Russian).

7. Li Y., Theodoulidis T., YunTian G. Magnetic Field-Based Eddy-Current Modeling for Multilayered Specimens. *IEEETrans. Magn*., 2007, vol. 43, pp. 4010–4015. **doi:** 10.1109/TMAG.2007.904930

8. Kljuev V.V., Sosnin F.R., Kovalev A.V. *Nerazrushajushhij kontrol' i diagnostika* [Nondestructive testing and diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 656 p.

9. Bazhenov I.N., Ivanov Ju.B. [Method of two-parameter control of the thickness of non-magnetic metallic coatings]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tehniki i tehnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2015, no. 3, pp. 127-132.

10. May P., Zhou E., Morton D. Numerical modeling and implementation of ferrite cored eddy current probes. *NDT&E Internat*., 2007, vol. 40, pp. 566–576. **doi:** 10.1016/j.ndteint.2007.06.003