

ВЫБОР РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЫ ВИХРЕТОКОВОГО ТОЛЩИНОМЕРА С НАКЛАДНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Чернышев А.В.

Институт прикладной физики НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Показано, что при использовании вихретокового толщиномера с накладным преобразователем максимальную толщину проводящих листов (или проводящих поверхностных слоев двухслойного изделия), которую можно проконтролировать при выбранной частоте тока возбуждения преобразователя, можно оценить, основываясь на величине глубины проникновения плоской электромагнитной волны в полупространство, удельная электрическая проводимость и относительная магнитная проницаемость которого равны значениям этих параметров у контролируемых листов (или поверхностных слоев двухслойного изделия).

Ключевые слова: вихретоковый толщиномер, глубина проникновения, накладной преобразователь.

Введение

При разработке вихретокового толщиномера или работе с ним обычно необходимо выбрать оптимальное значение рабочей частоты поля возбуждения, при которой обеспечивается контроль толщины проводящего листа или толщины поверхностного слоя двухслойного изделия в определенном интервале величин этих толщин и при этом достигается отстройка от влияния определенных мешающих факторов. Например, мешающим фактором при контроле толщины верхнего слоя двухслойного изделия могут быть вариации толщины подложки. Для отстройки от влияния на показания толщиномера вариаций электропроводности верхнего слоя двухслойного изделия необходимо ее измерить, однако при этом на результаты измерения электропроводности вихретоковым методом не должны сказываться вариации толщины этого слоя. В результате необходимо иметь представление о том, с какой максимальной глубины контролируемого материала может быть получена информация об его электромагнитных параметрах на основе анализа вторичного сигнала накладного вихретокового преобразователя. При вихретоковом методе контроля считается, что максимальная глубина, с которой может быть получена информация об электромагнитных параметрах проводящего материала, в который проникает первичное переменное электромагнитное поле, а анализ пово-

дится по измерению параметров создаваемого этим материалом вторичного электромагнитного поля, определяется величиной, при которой амплитуда плотности вихревого тока уменьшается в $1/e^3$ раз. Такое уменьшение плотности вихревых токов наблюдается на глубине, примерно равной 3δ (где δ – глубина проникновения рассматриваемого электромагнитного поля в рассматриваемый материал) [1, 2], на такой глубине амплитуда плотности вихревых токов составляет примерно 5 % от амплитуды плотности вихревых токов на поверхности рассматриваемого образца.

Известна формула для определения глубины проникновения плоской электромагнитной волны в проводящее полупространство, обозначим ее как стандартную глубину проникновения δ_{st} [3]:

$$\delta_{st} = 503 \sqrt{\frac{1}{F \mu \sigma}}, \quad (1)$$

где F – частота поля возбуждения (Гц); μ – относительная магнитная проницаемость полупространства; σ – его удельная электрическая проводимость (См/м).

Чаще всего в вихретоковых толщиномерах в качестве чувствительного элемента используются накладные преобразователи, содержащие катушку поля возбуждения относительно небольших размеров (как правило, ее диаметр находится в пределах нескольких миллимет-

ров). Также известно, что распределение в пространстве амплитуды напряженности переменного магнитного поля, создаваемого катушкой с током, существенно отличается от распределения в пространстве амплитуды напряженности переменного магнитного поля плоской электромагнитной волны, для которой справедливо выражение (1). Амплитуда напряженности переменного магнитного поля катушки убывает по мере удаления от нее, в то время как амплитуда напряженности магнитного поля плоской электромагнитной волны распределена однородно в пространстве. В результате при расположении катушки с переменным током над проводящим полупространством амплитуда напряженности магнитного поля в нем уменьшается по мере удаления от поверхности не только из-за возникновения в полупространстве вихревых токов, но и из-за неоднородного распределения в нем амплитуды напряженности переменного магнитного поля катушки. Это приводит к тому, что реальная глубина проникновения δ переменного магнитного поля, создаваемого катушкой, в проводящее полупространство оказывается меньше глубины проникновения δ_{st} в это полупространство плоской электромагнитной волны [3, 4]. Тот же результат относится и к случаю рассмотрения затухания в проводящем полупространстве плотности наводимых в нем вихревых токов. Оценить глубину проникновения вихревых токов, наводимых полем возбуждения накладной катушки с током, можно на основе численных вычислений для каждого конкретного случая (т.е. при известных геометрических размерах катушки поля возбуждения, его частоты и электромагнитных параметрах полупространства, в которое проникает это поле) на основе известных из литературы аналитических выражений.

Вопрос о том, до какой максимальной толщины проводящего листа или проводящего поверхностного слоя, расположенного на проводящем основании, можно осуществлять контроль при помощи вихретокового толщиномера с накладным преобразователем (в виде витка с током) при заданных частоте тока возбуждения и радиусе витка рассмотрен в настоящей работе.

Применяемая модель и методика расчетов

Полагается, что над проводящим листом (конечной толщины и бесконечной протяженности) или двухслойной средой (которая представ-

ляет собой верхний слой конечной толщины и нижнее проводящее немагнитное или магнитное полупространство – подложку) расположен виток радиусом R , через который пропускается переменный ток синусоидальной формы частотой F . Между ним и проводящей средой находится измерительный виток, радиус которого также равен R . Пример расположения витков над двухслойной средой показан на рисунке 1. Виток поля возбуждения расположен на высоте h над поверхностью двухслойной среды (или листа), измерительный виток расположен между ним и поверхностью двухслойной среды (или листа) на расстоянии $0,5 \cdot h$ от нее, оси витков совпадают и перпендикулярны поверхности проводящей среды. Толщина верхнего слоя двухслойной среды (или листа) равна d .

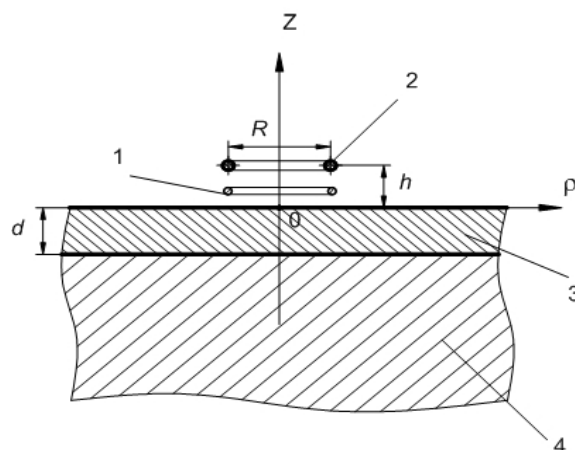


Рисунок 1 – Витки над проводящей двухслойной средой: 1 – измерительный виток; 2 – виток поля возбуждения; 3 – проводящее покрытие; 4 – проводящая подложка бесконечной толщины

Анализируются зависимости амплитуды эдс измерительной катушки от толщины d при различных частотах F для разных материалов, а также определяется глубина проникновения вихревых токов δ в верхний слой двухслойной среды (или листа) на основе анализа зависимости амплитуды плотности вихревых токов J от расстояния до поверхности двухслойной среды (или листа). Для определения амплитуды эдс измерительной катушки и амплитуды плотности вихревых токов J находится модуль комплексной амплитуды вектор-потенциала \dot{A} в листе или верхнем слое двухслойной среды (\dot{A}_1) и в свободном пространстве (\dot{A}_0) над ней по аналитическим выражениям, приведенным в [5]. Для \dot{A}_1 имеем:

$$\dot{A}_1 = \frac{\mu_0 \mu_2 R I}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda R) J_1(\lambda \rho) (f_2 e^{q_2 z} + \varphi_2 e^{-q_2 z}) \frac{\lambda e^{-\lambda h}}{q_2} d\lambda,$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; I – амплитуда синусоидального тока в витке; J_1 – функция Бесселя первого рода первого порядка; ρ – расстояние от продольной оси витка, отсчитываемое в радиальном направлении; z – координата рассматриваемой точки (при расчетах применяется цилиндрическая система координат) вдоль оси Z (начало координат и оси ρ и Z показаны на рисунке 1); λ – переменная интегрирования;

$$f_2 = \frac{2q_2(\mu_3 q_2 + \mu_2 q_3)}{\Lambda} e^{dq_2};$$

$$\varphi_2 = \frac{2q_2(\mu_3 q_2 - \mu_2 q_3)}{\Lambda} e^{-dq_2};$$

$$q_2 = \sqrt{\lambda^2 + i\omega\sigma_2\mu_0\mu_2};$$

$$q_3 = \sqrt{\lambda^2 + i\omega\sigma_3\mu_0\mu_3};$$

$$\Lambda = (\lambda\mu_2 + q_2)(\mu_2 q_3 + \mu_3 q_2) e^{dq_2} - (\lambda\mu_2 - q_2)(\mu_2 q_3 - \mu_3 q_2) e^{-dq_2}.$$

Здесь i – мнимая единица; μ_2 – относительная магнитная проницаемость верхнего слоя двухслойной среды или листа; σ_2 – удельная электрическая проводимость верхнего слоя или листа; μ_3 – относительная магнитная проницаемость подложки двухслойной среды; σ_3 – ее удельная электрическая проводимость; ω – угловая частота поля возбуждения.

Для \dot{A}_0 аналитическое выражение имеет вид:

$$\dot{A}_0 = \frac{\mu_0 R I}{2} \int_0^\infty J_1(\lambda R) J_1(\lambda \rho) \varphi_1 e^{-\lambda(z+h)} d\lambda,$$

где:

$$\varphi_1 = (1/\Lambda) \cdot [(\lambda\mu_2 - q_2) \cdot (\mu_3 q_2 + \mu_2 q_3) \cdot e^{dq_2} - (\lambda\mu_2 + q_2)(\mu_2 q_3 - \mu_3 q_2) e^{-dq_2}].$$

Комплексная амплитуда эдс измерительной обмотки \dot{E} определяется из выражения

$\dot{E} = -i2\pi R\omega\dot{A}_0$ [6], комплексная амплитуда плотности вихревого тока \dot{J} определяется выражением $\dot{J} = -i\omega\sigma_2\dot{A}_1$. Вектор-потенциал в рассматриваемом случае имеет только φ -ю компоненту, соответственно только такую компоненту имеет и \dot{J} .

Результаты вычислений

Полагаем, что виток, создающий поле возбуждения, имеет радиус 0,003 м, он расположен над проводящим немагнитным листом, σ материала которого равна $6 \cdot 10^7$ См/м (что примерно соответствует электропроводности меди), $h = 0,001$ м (рисунок 1). Считаем, что через виток пропускается переменный ток амплитудой 1 А и частотой $F = 10$ кГц. Анализируется амплитуда E эдс измерительного витка. Первоначально полагается, что толщина листа d заведомо больше той глубины, с которой возможно зафиксировать информацию об отклонениях от однородного распределения σ в объеме этого листа на основе измерений величины E (т.е. считаем толщину листа бесконечно большой). Так, при $d = 1$ м амплитуда эдс E измерительного витка равна $171,588 \pm 0,001$ мкВ, обозначим ее как E_0 . Далее расчет E проводится при все меньших значениях d . При уменьшении d до 800 мкм величина E изменяется относительно E_0 на $0,300 \pm 0,001$ мкВ (или на $0,175 \pm 0,001$ %). При дальнейшем уменьшении d величина E начинает изменяться более заметно. Например, при уменьшении d с 800 мкм до 600 мкм значение E изменяется на $0,63 \pm 0,01$ %, что вполне может быть зафиксировано электронными средствами измерения. Для рассматриваемого материала листа при $F = 10$ кГц величина стандартной глубины проникновения δ_{st} , рассчитанная по формуле (1), равна $649,370 \pm 0,001$ мкм. Таким образом, из расчета следует, что на основе измерения E можно получить информацию о толщине листа, когда она не превышает 800 мкм, что соответствует $(1,23 \pm 0,01) \cdot \delta_{st}$. Если при прежних значениях F и R проводится контроль двухслойного образца, имеющего диэлектрический или слабо проводящий верхний слой, расположенный на подложке, имеющей то же значение $\sigma = 6 \cdot 10^7$ См/м, то полученный выше результат означает, что при толщинах подложки, превы-

шающих $(1,23 \pm 0,01) \cdot \delta_{st}$. (в этом случае δ_{st} обозначает стандартную глубину проникновения электромагнитного поля в материал подложки), вариации ее толщины не окажут влияния на E .

Теперь определим реальную глубину проникновения δ вихревых токов в проводящее полупространство (с прежним значением проводимости его материала $\sigma = 6 \cdot 10^7$ См/м), наводимых полем возбуждения прежнего витка с током той же частоты. Отметим, что амплитуда плотности вихревых токов J распределена неравномерно в проводящем полупространстве – по мере увеличения координаты вдоль оси ρ от нулевого значения (при некотором фиксированном «отрицательном» значении координаты вдоль оси Z (рисунок 1)) она возрастает от нулевого (при $\rho = 0$) до максимального значения, достигаемого при $\rho \approx R$. При дальнейшем росте ρ амплитуда плотности вихревых токов уменьшается. Поэтому расчет глубины проникновения вихревых токов проводится при $\rho = R = 0,003$ м. Он показал, что в рассматриваемом случае $\delta = 347,369 \pm 0,001$ мкм, т.е. $\delta = (0,534 \pm 0,001) \cdot \delta_{st}$ (напомним, что для данного материала при выбранной частоте $\delta_{st} = 649,371 \pm 0,001$ мкм). Если в качестве информационного параметра использовать величину δ , то из приведенных данных следует, что максимальная толщина листа, которую можно контролировать на основе измерения амплитуды E , составляет $(2,30 \pm 0,01) \cdot \delta$ (что в данном случае соответствует 800 мкм). Дальнейшее увеличение d не приводит к изменению величины E .

Рассмотрим результаты расчета для прежней системы витка над листом, но полученные при более высокой частоте поля возбуждения, а именно при $F = 300$ кГц. В этом случае, как следует из расчетов, для рассматриваемого полупространства $\delta_{st} = 118,558 \pm 0,001$ мкм, а $\delta = 57,044 \pm 0,001$ мкм. Изменения величины E по мере уменьшения d от «бесконечно большого» значения наблюдаются, начиная со значения $d = 100$ мкм. При уменьшении d от 100 мкм до 80 мкм величина E изменяется на $0,42 \pm 0,01$ %. Видно, что и в этом случае выполняется, с довольно высокой точностью, соотношение $\delta \approx 0,5 \cdot \delta_{st}$. Также видно, что и теперь на основе измерения величины E можно получить информацию о толщине листа, когда она не превышает значения δ_{st} . Если основываться на рассчитанном для рассматриваемого случая значении δ , то получаем следующий

результат – максимальная толщина листа, которую можно контролировать на основе измерения амплитуды E , составляет $(1,75 \pm 0,01) \cdot \delta$.

При расчете для случая расположения витка с током над двухслойной средой полагается, что немагнитный верхний слой имеет $\sigma = 5,26 \cdot 10^6$ См/м (что примерно соответствует удельной проводимости хрома), а подложка бесконечно большой толщины магнитная ($\mu = 40$), удельная электрическая проводимость σ ее материала равна $1,15 \cdot 10^7$ См/м (что примерно соответствует удельной электрической проводимости никеля). Частота F принята равной 300 кГц, все остальные параметры катушек и амплитуды тока возбуждения такие же, как в предыдущем случае. Для верхнего слоя при выбранной частоте поля возбуждения $\delta_{st} = 400,419 \pm 0,001$ мкм, реальная глубина проникновения δ вихревых токов в верхний слой, полученная расчетным способом, составляет $206,360 \pm 0,001$ мкм. В этом случае расчет показывает, что при уменьшении толщины d верхнего слоя с «бесконечно большой» величины до 400 мкм амплитуда E сохраняет первоначальное значение E_0 , а при уменьшении d с 400 мкм до 300 мкм амплитуда E изменяется на $1,15 \pm 0,01$ %. Следовательно, и в этом случае выполняется достаточно точно соотношение $\delta \approx 0,5 \cdot \delta_{st}$, а толщину верхнего слоя можно определять на основе измерения амплитуды E , лишь когда она не превышает δ_{st} . Если в качестве информационного параметра использовать δ , то получаем следующий результат – максимальная толщина верхнего слоя, которую можно проконтролировать по измерениям E , составляет $(1,93 \pm 0,01) \cdot \delta$ (что составляет 400 мкм).

При расчетах, полученных при расположении витка с током прежних размеров над магнитным проводящим листом, полагалось, что относительная магнитная проницаемость материала листа $\mu = 100$, а его проводимость $\sigma = 8 \cdot 10^6$ См/м (что приблизительно соответствует характеристикам стального листа), расчет проведен при $F = 10$ кГц, амплитуда тока возбуждения равна 1 А. В этом случае величина реальной глубины проникновения вихревых токов δ несколько ближе к стандартному значению δ_{st} , чем наблюдалось ранее, а именно $\delta_{st} = 177,837 \pm 0,001$ мкм, а $\delta = 135,030 \pm 0,001$ мкм, т.е. $\delta = (0,763 \pm 0,001) \cdot \delta_{st}$. По мере уменьшения толщины листа от «бесконечно большой» E сохраняет первоначальное значение E_0 до вели-

чины d , равной 300 мкм. При уменьшении d с 300 мкм до 170 мкм амплитуда E изменяется на $0,49 \pm 0,01$ %. Таким образом, в этом случае получить информацию о толщине листа на основе измерения величины E можно при условии, что она не превышает, величину $(1,68 \pm 0,01) \cdot \delta_{st}$ (что в данном случае составляет 300 мкм). Если в качестве информационного параметра взять δ , то получаем следующий результат – максимальная глубина, с которой возможно зафиксировать изменения толщины листа на основе анализа амплитуды E , составляет $(2,22 \pm 0,01) \cdot \delta$.

Заключение

Расчеты показывают, что при применении вихретокового толщиномера с накладным преобразователем максимальная толщина контролируемого проводящего листа или проводящего покрытия двухслойной среды, которую можно проконтролировать при выбранной частоте тока возбуждения преобразователя, примерно равна удвоенному значению реальной глубины проникновения δ вихревых токов, наводимых в рассматриваемом листе или покрытии полем возбуждения преобразователя.

Из расчетов также следует, что удвоенная величина δ близка к значению стандартной глубины проникновения δ_{st} вихревых токов, формирующихся при распространении в том же материале листа или покрытия плоской электромагнитной волны (прежней частоты) и определяемой известным выражением (1).

Таким образом, по значению δ_{st} можно судить о максимальной толщине проводящего листа или поверхностного проводящего слоя, рас-

положенного на проводящем основании, которую можно проконтролировать при выбранной частоте тока возбуждения накладного преобразователя. Расчет проведен для витка с током, расположенным над проводящим (магнитным или немагнитным) полупространством или двухслойной средой. Приведенные в статье результаты остаются справедливыми при значениях радиусах витка, находящихся в интервале 0,002–0,01 м, и при частотах поля возбуждения в интервале от 1 кГц до 1 МГц.

Список использованных источников

1. Mottl, Z. The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing / Z. Mottl // NDT International. – 1990. – Vol. 23, № 1. – P. 11–18.
2. Mook, G. Deep Penetrating Eddy Current and Probes / G. Mook, O. Hesse, V. Uchanin // 9-th Europ. Conf. On NDT. – Berlin, 2006. – Режим доступа : <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.6.2.pdf>.
3. Дорофеев, А.Л. Индукционная структуроскопия / А.Л. Дорофеев. – М.: Энергия, 1973. – 176 с.
4. Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. / под общ. ред. В.В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – Т. 2. Вихретоковый контроль. Кн. 2. – 688 с.
5. Соболев, В.С. Накладные и экранные датчики / В.С. Соболев, Ю.М. Шкарлет. – Новосибирск : Наука, 1967. – 144 с.
6. Dodd, C.V. Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems / C.V. Dodd, W.E. Deeds // J. Appl. Phys. – 1968. – Vol. 39, № 6. – P. 2829–2838.

CHOOSING OF OPERATING FREQUENCY OF EDDY CURRENT THICKNESS METER WITH SUPERIMPOSED TRANSDUCER

Chernyshev A.V.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: lab5@iaph.bas-net.by

Abstract. It is shown that when using eddy current thickness meter with superimposed transducer the maximal thickness of the conductive sheets or conductive surface layers of a two-layer wares, which may be

controlled with selected frequency of excitation current of the transducer, can be estimated based on the magnitude of the penetration depth of a plane electromagnetic wave in the half-space, the specific electrical conductivity and the relative magnetic permeability of which is equal to the values of these parameters in a controlled surface layer or sheet of two-layer ware.

Keywords: eddy current thickness meter, depth of penetration, superimposed transducer.

References

1. Mottl Z. The quantitative relations between true and standard depth of penetration for air-cored probe coils in eddy current testing. *NDT International*, 1990, vol. 23, № 1, pp. 11–18.
2. Mook G., Hesse O., Uchanin V. 9-th Europ. Conf. On NDT. Berlin, 2006. – Abstracts book. Part 1, Index Tu.3.6.2. Available at: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.6.2.pdf> (accessed 17.02.2014).
3. Dorofeev A.L. *Indukcionnaya strukturoskopiya* [Induction structuroscopy]. Moscow, Jenergija Publ., 1973. 176 p. (in Russian).
4. *Nerazrushayushiy kontrol'* [Nondestructive testing]. *Spravochnik v 7 tomah* [Reference book in 7 vol.] *Pod obshh. red. Kljueva V.V.* Moskow, Mashinostroenie Publ., 2003, Vol. 2. *Vikhretokovyy kontrol'* [Eddy current testing]. Book 2. 688 p. (in Russian).
5. Sobolev V.S., Shkarlet Ju. M. *Nakladnyye i yekrannyye datchiki* [Superimposed and screen transducer]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1967. 144 p. (in Russian).
6. Dodd C.V., Deeds W.E. Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems. *J. Appl. Phys*, 1968, vol. 39, № 6, pp. 2829–2838.

Поступила в редакцию 22.01.2014.