

Ю. А. Выгода

ОДНОВРЕМЕННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ КАЖДОЙ ИЗ КОМПОНЕНТ ДВУХСЛОЙНОГО ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ

За последние годы в отечественной и зарубежной промышленности для измерения толщины гальванических покрытий широко применяются приборы, использующие метод вихревых токов. Теоретические основы этого метода применительно к контролю толщины однослойных покрытий с помощью накладного датчика изложены в работе [1]. Однако в гальванической практике, наряду с однослойными, получили большое распространение и многослойные, в частности двухслойные покрытия. Контроль толщины каждого слоя таких покрытий с помощью обычных приборов, использующих метод вихревых токов, может производиться только последовательно, после нанесения соответствующего слоя на деталь. Поэтому представляет интерес разработка теории и создание таких приборов, которые позволили бы измерять толщину каждого покрытия одновременно на окончательно покрытой детали.

Как показано в [1], полное сопротивление низкой цилиндрической или дисковой катушки, находящейся на расстоянии h от плоского проводника (h мало по сравнению с радиусом катушки), может быть выражено следующей приближенной формулой:

$$Z = R_0 + j\omega(L_0 - M) + \frac{\zeta}{\mu_0} \left[-\frac{\partial M}{\partial h} \right], \quad (1)$$

где R_0 — активное сопротивление;

L_0 — индуктивность катушки при отсутствии проводника;

$\omega = 2\pi f$ (f — частота тока);

M — взаимная индуктивность между катушкой и ее зеркальным изображением;

μ_0 — магнитная проницаемость пустоты;

$\gamma = \frac{E_0}{H_0}$ — удельное поверхностное сопротивление плоского проводника, которое находится в предположении, что на проводник падает плоская однородная волна (это допустимо при малых расстояниях между проводником и катушкой).

В последнем равенстве E_0 и H_0 — соответственно напряженности электрического и магнитного полей на поверхности проводника.

Имеется плоский проводник с двухслойным покрытием (рис. 1).

Введем следующие обозначения:

d — толщина
 μ_1 — магнитная проницаемость
 σ_1 — удельная проводимость

наружного
покрытия;

$$\delta_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_1 \sigma_1}} \text{ — глубина проникновения поля в металл}$$

t —

μ_2 —
 σ_2 —

аналогичные
параметры
внутреннего
покрытия;

$$\delta_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_2 \sigma_2}}$$

μ_3 —
 σ_3 —

аналогичные пара-
метры основы, тол-
щина которой пред-
полагается бесконеч-
но большой.

$$\delta_3 = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_3 \sigma_3}}$$

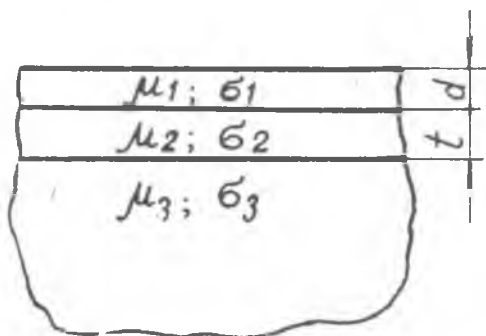


Рис. 1. Плоский образец с двухслойным покрытием.

Для определения удельного поверхностного сопротивления плоского проводника с двухслойным покрытием используем дифференциальное уравнение плоской однородной волны.

$$\frac{d^2 E}{dz^2} = \gamma^2 E, \quad (2)$$

где $\gamma^2 = j\omega\mu\sigma$, и соотношение

$$\frac{dE}{dz} = -j\omega\mu H. \quad (3)$$

Решение уравнения (2) в случае проводника с двухслойным покрытием ищется отдельно для каждого покрытия и для основы.

$$E_1 = A \operatorname{sh} \gamma_1 z + B \operatorname{ch} \gamma_1 z; \quad (4)$$

$$E_2 = C \operatorname{sh} \gamma_2 z + D \operatorname{ch} \gamma_2 z; \quad (5)$$

$$E_3 = F \cdot e^{-\gamma_3 z}, \quad (6)$$

где

$$\gamma_1 = \sqrt{j\omega\mu_1\epsilon_1} = \frac{1 + j}{\delta_1};$$

$$\gamma_2 = \sqrt{j\omega\mu_2\epsilon_2} = \frac{1 + j}{\delta_2};$$

$$\gamma_3 = \sqrt{j\omega\mu_3\epsilon_3} = \frac{1 + j}{\delta_3}.$$

Далее, используя (3):

$$H_1 = - \frac{\gamma_1}{j\omega\mu_1} (A \operatorname{ch} \gamma_1 z - B \operatorname{sh} \gamma_1 z), \quad (7)$$

$$H_2 = - \frac{\gamma_2}{j\omega\mu_2} (C \operatorname{ch} \gamma_2 z + D \operatorname{sh} \gamma_2 z), \quad (8)$$

$$H_3 = \frac{\gamma_3}{j\omega\mu_3} \cdot F \cdot e^{-\gamma_3 z} \quad (9)$$

Постоянные интегрирования находим из условия равенства тангенциальных составляющих E и H на границах раздела наружного и внутреннего покрытия и внутреннего покрытия и основы, с учетом того, что при $z=0$ $E = E_0$.

Таким образом, введя обозначения

$$N = \sqrt{\frac{\mu_2\epsilon_1}{\mu_1\epsilon_2}} = \frac{\epsilon_1\delta_1}{\epsilon_2\delta_2},$$

$$P = \sqrt{\frac{\mu_3\epsilon_2}{\mu_2\epsilon_3}} = \frac{\epsilon_2\delta_2}{\epsilon_3\delta_3},$$

и положив

$$\Theta = \operatorname{sh} \gamma_1 d (\operatorname{ch} \gamma_2 t + P \operatorname{sh} \gamma_2 t) + N \operatorname{ch} \gamma_1 d (\operatorname{sh} \gamma_2 t + P \operatorname{ch} \gamma_2 t), \quad (10)$$

будем иметь;

$$A = E_0 \frac{\operatorname{ch} \gamma_1 d (\operatorname{ch} \gamma_2 t + P \operatorname{sh} \gamma_2 t) + N \operatorname{sh} \gamma_1 d (\operatorname{sh} \gamma_2 t + P \operatorname{ch} \gamma_2 t)}{\Theta}, \quad (11)$$

$$B = E_0, \quad (12)$$

$$C = -E_0 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \frac{\operatorname{ch} \gamma_2 (d + t) + P \operatorname{sh} \gamma_2 (d + t)}{\Theta}, \quad (13)$$

$$D = E_0 \frac{\gamma_2}{\gamma_1} \cdot \frac{\operatorname{sh} \gamma_2 (d + t) + P \operatorname{ch} \gamma_2 (d + t)}{\Theta}, \quad (14)$$

$$F = E_0 \frac{\gamma_3}{\gamma_1} \cdot \frac{e^{-\gamma_3 (d + t)}}{\Theta}. \quad (15)$$

Напряженность магнитного поля на поверхности проводника с учетом (7)

$$H_0 = - \frac{\gamma_1}{j\omega\mu_1} \dot{A} = E_0 \cdot \frac{\gamma_1}{j\omega\mu_1} \cdot \frac{\operatorname{ch} \gamma_1 d + [N \operatorname{sh} \gamma_1 d] \cdot f(t)}{\operatorname{ch} \gamma_1 d + [N \operatorname{ch} \gamma_1 d] \cdot f(t)}, \quad (16)$$

где

$$f(t) = \frac{\operatorname{sh} \gamma_2 t + P \operatorname{ch} \gamma_2 t}{\operatorname{ch} \gamma_2 t + P \operatorname{sh} \gamma_2 t}, \quad (17)$$

и удельное поверхностное сопротивление проводника с двухслойным покрытием

$$Z_{2n} = \frac{E_0}{H_0} = \frac{j\omega\mu_1}{\gamma_1} \cdot \frac{\operatorname{sh} \gamma_1 d + [N \operatorname{ch} \gamma_1 d] \cdot j(f)}{\operatorname{ch} \gamma_1 d + [N \operatorname{sh} \gamma_1 d] \cdot j(f)},$$

а так как

$$\frac{j\omega\mu_1}{\gamma_1} = Z_{11} \quad \text{то}$$

$$Z_{2n} = Z_{11} \cdot \frac{\operatorname{sh} \gamma_1 d + [N \operatorname{ch} \gamma_1 d] \cdot j(f)}{\operatorname{ch} \gamma_1 d + [N \operatorname{sh} \gamma_1 d] \cdot j(f)}. \quad (18)$$

Введем обозначение $\varepsilon = \frac{d}{\delta_1}$.

Так как под знаком гиперболических функций стоит комплексная величина $\gamma_1 = \frac{1+j}{\delta_1}$, то после преобразований получаем

$$Z_{2n} = R_{2n} + jX_{2n} = \frac{1}{Z_{11}\delta_1} \cdot \frac{\operatorname{sh}(2\varepsilon + 2j) \pm \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch}(2\varepsilon + 2j) \pm \cos 2\varepsilon} + \frac{j}{Z_{11}\delta_1} \cdot \frac{\operatorname{sh}(2\varepsilon + 2j) + \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch}(2\varepsilon + 2j) + \cos 2\varepsilon}, \quad (19)$$

где верхние знаки соответствуют случаю

$$N \cdot j(t) < 1$$

и тогда

$$\chi = \operatorname{arth} [N \cdot f(t)],$$

а нижние знаки соответствуют случаю

$$N \cdot f(t) < 1$$

и тогда

$$\chi = \operatorname{arch} [N \cdot f(t)].$$

В свою очередь

$$f(t) = \frac{\operatorname{sh}(2\varphi + 2j) + j \sin 2\varphi}{\operatorname{ch}(2\varphi + 2j) \pm \cos 2\varphi}, \quad (20)$$

где $\varphi = \frac{t}{\delta_2}$, верхние знаки соответствуют случаю $P < 1$, и тогда $\Psi = \operatorname{arth} P$, а нижние знаки соответствуют случаю $P > 1$, и тогда $\Psi = \operatorname{arch} P$.

Как явствует из (20), $f(t)$ также является величиной комплексной, но если учитывать в $f(t)$ мнимую часть, формула (19) приобретает слишком громоздкий вид. Поэтому мы примем во внимание, что

$$\operatorname{sh}(2\varphi + 2\psi) > \sin 2\varphi,$$

и будем приближенно считать

$$f(t) \approx \frac{\operatorname{sh}(2\varphi + 2\psi)}{\operatorname{ch}(2\varphi + 2\psi) + \cos 2\varphi}. \quad (21)$$

Таким образом, если катушка датчика находится над проводником, имеющим двухслойное покрытие, ее полное сопротивление будет равно:

$$Z_{2n} = R_0 + \frac{F_R(\varepsilon, \varphi)}{\mu_0 \varepsilon_1 \rho_1} \cdot \left[-\frac{\partial M}{\partial h} \right] + j \left\{ \omega(L_0 - M) + \frac{F_L(\varepsilon, \varphi)}{\mu_0 \varepsilon_1 \rho_1} \cdot \left[-\frac{\partial M}{\partial h} \right] \right\}, \quad (22)$$

где

$$F_R(\varepsilon, \varphi) = \frac{\operatorname{sh}(2\varepsilon + 2\gamma) - \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch}(2\varepsilon + 2\gamma) - \cos 2\varepsilon} \quad (23)$$

и

$$F_L(\varepsilon, \varphi) = \frac{\operatorname{sh}(2\varepsilon + 2\gamma) + \sin 2\varepsilon}{\operatorname{ch}(2\varepsilon + 2\gamma) + \cos 2\varepsilon} \quad (24)$$

Из формулы (22) явствует, что Z_{2n} является уравнением с двумя неизвестными: толщиной наружного покрытия d и толщиной внутреннего покрытия t .

Влияние основы, как и в других приборах, можно устранить установкой нуля по непокрытой детали, однако для отдельного определения d и t необходимо еще одно уравнение, содержащее эти величины. Такое уравнение можно получить, если в формуле (22) взять другое значение частоты.

С практической точки зрения это означает, что прибор для измерения толщины каждой из компонент двухслойного покрытия должен иметь два генератора с частотами $\omega_1 = 2\pi f_1$ и $\omega_2 = 2\pi f_2$, две измерительные схемы, к которым поочередно подключается один датчик и два указателя.

На рис. 2 изображена блок-схема такого прибора, предназначенного для измерения толщины никелевого (наружное) и медного (внутреннее) покрытий на стали.

Первый генератор прибора питает напряжением с частотой 2 мГц первую измерительную схему, представляющую собой квазиуравновешенный мост с дифференциальным указателем, второй генератор питает напряжением с частотой 10 мГц вторую измерительную схему, аналогичную первой.

Процесс измерения толщины каждого покрытия с помощью описываемого прибора заключается в следующем.

Датчик прибора помещается на непокрытую деталь, переключатель Π переводится в положение 1 , в результате чего датчик оказывается подключенным к первой измерительной схеме, и указатель $У_1$ устанавливается на нуль. Затем переключатель перево-

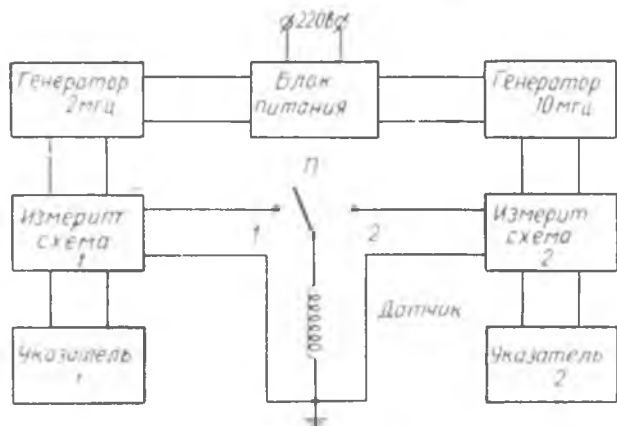


Рис. 2. Блок-схема прибора для контроля толщины двухслойных покрытий.

дится в положение 2 , датчик оказывается подключенным ко второй измерительной схеме, и указатель $У_2$ устанавливается на нуль. После этого датчик помещается на деталь с двухслойным покрытием и по шкале указателя $У_2$ снимается отсчет I_2 , затем переключатель Π переводится в

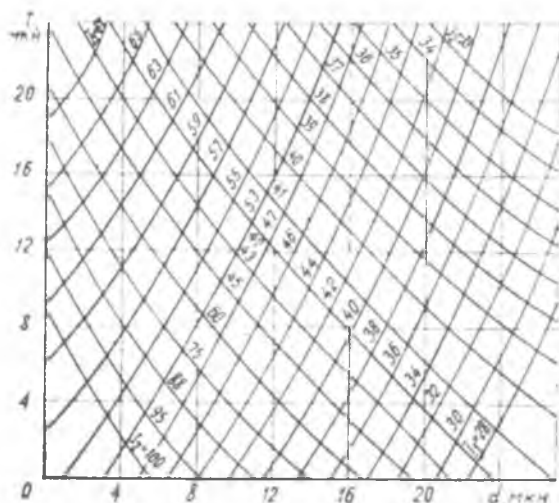


Рис. 3. Диаграмма для отсчета толщины каждой из компонент двухслойного покрытия.

положение 1 и по шкале указателя $У_1$ снимается отсчет I_1 . Значения I_1 и I_2 используются для определения искомых толщин покрытий d и t и по диаграмме, изображенной на рис. 3.

По вертикальной оси диаграммы откладывается толщина медного покрытия, по горизонтальной оси — толщина никелевого покрытия в микронах.

На диаграмме имеется два семейства кривых, одно для частоты 2 мГц, второе — для ча-

стоты 10 мц. Каждая кривая первого семейства соответствует определенному значению тока через первый указатель, каждая кривая второго семейства — определенному значению тока через второй указатель.

Получив в процессе измерения токи I_{1m} и I_{2n} , находят на диаграмме точку пересечения соответствующих кривых. Абсцисса этой точки даст величину никелевого покрытия, ордината — толщину медного покрытия.

Чем меньше взяты интервалы между дискретными значениями токов I_1 и I_2 , тем чаще сеть кривых, тем точнее определяются по диаграмме толщины покрытий. Однако ввиду того, что диаграмма строится по эталонным образцам с двухслойным покрытием, увеличение числа кривых на диаграмме связано со значительным увеличением числа эталонов, изготовление которых нередко сопряжено с немалыми трудностями.

Произведенные испытания показали пригодность описанного прибора для одновременного измерения толщины каждой из компонент двухслойного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Выгода. Теоретические основы метода вихревых токов применительно к контролю толщины гальванических покрытий с помощью накладной катушки. Ученые записки Пензенского политехнического института, секция электроизмерительной техники, выпуск 1, 1962.
