
Измерение толщины покрытий из драгоценных металлов с использованием вихретокового вида контроля

Сотрудники
ЗАО «Константа»,
Санкт-Петербург



**Сясько
Владимир
Александрович**
Генеральный ди-
ректор, д. т. н.



**Ивкин
Антон
Евгеньевич**
Ведущий специа-
лист, к. т. н.

Серебро, золото, медь, родий, а также их сплавы широко применяются для покрытия изделий из латуни, бронзы, титана и других конструкционных цветных металлов в различных отраслях промышленности, главным образом в электротехнической. Диапазон толщин, рекомендуемый ГОСТ 9.303 для основной массы упомянутых покрытий, составляет от 0,5 до 15 мкм, а максимальная толщина покрытия из драгоценного металла, как правило, не превышает 6–9 мкм. Электропроводность σ_n серебряных, медных покрытий, а также покрытий из их сплавов лежит в диапазоне от ≈ 55 до ≈ 65 МСм/м, электропроводность золотых покрытий и покрытий сплавами родия несколько ниже и лежит в диапазоне $\approx 45 \div 50$ МСм/м. Электропроводность оснований σ_o находится в диапазоне от ≈ 2 (титан) до ≈ 16 МСм/м (латунь марки ЛС, некоторые виды бронзы). Для перечисленных сочетаний покрытие/основание относительная электропроводность покрытия σ_n/σ_o будет лежать в диапазоне от 32,5 (серебро на титане) до 2,8 МСм/м (золото на латуни).

Задача измерения толщины покрытий может быть решена с использованием вихретокового вида контроля.

Объект контроля представляет собой электропроводящее неферромагнитное покрытие толщиной T_n и электропроводностью σ_n на неферромагнитном электропроводящем основании электропроводностью σ_o . Вихревые токи, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. Можно говорить о некотором интегральном значении

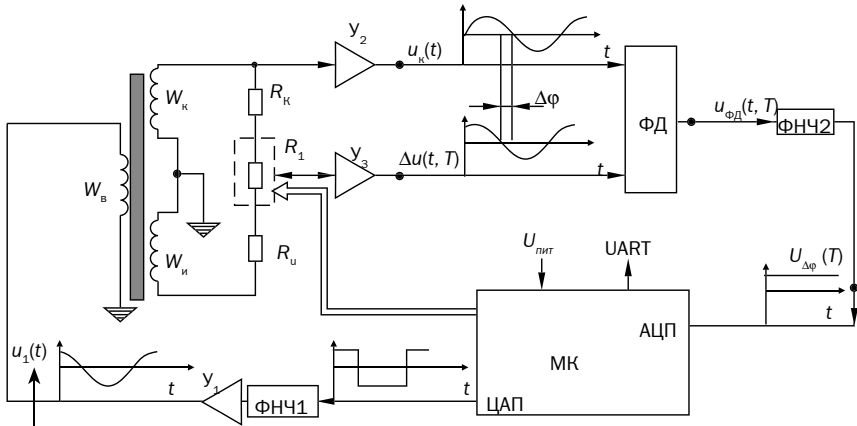


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя: $U_1 - U_3$ — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1 - ФНЧ2 — фильтры низкой частоты, W_B — обмотка возбуждения, W_K и W_I — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер, R_1 — управляемый цифровой балансировочный потенциометр

электропроводности $\sigma_{и}$ объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, которая изменяется в зависимости от толщины покрытия T_n . Так, если $T_n = 0$, то $\sigma_{и} = \sigma_0$. При увеличении толщины покрытия от нуля до значения $T_n = \infty$ $\sigma_{и}$ будет изменяться от σ_0 до σ_n [2].

Вихретоковый фазовый метод измерения толщины металлических покрытий основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля первичного преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте, зависящих от T_n , σ_n , σ_0 и геометрических характеристик основания и покрытия (диаметра d , шероховатости R_z и др.), а также от величины зазора h между металлическим покрытием и контактной поверхностью преобразователя.

Структурная схема трансформаторного трехобмоточного вихретокового фазового преобразователя, использующего в качестве опорного сигнала напряжение на компенсационной обмотке, изображена на рис. 1. Преобразователь выполнен в малогабаритном цилиндрическом корпусе, соединяемом с электронным блоком кабелем, по которому подается напряжение питания и организуется цифровой канал связи UART с блоком обработки и представления результатов измерений.

На рис. 2 представлен чувствительный элемент трансформаторного трехобмоточного вихретокового преобразователя, реализованный на стержневом феррите.

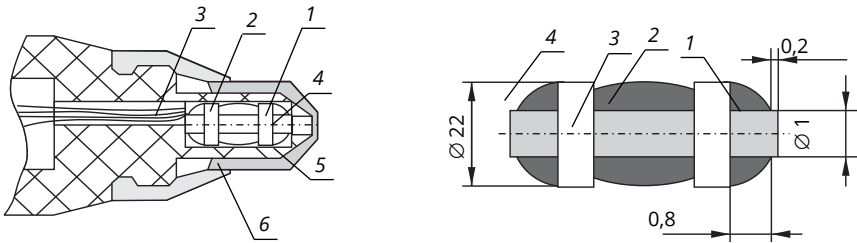


Рис. 2. Чувствительный элемент трансформаторного трехобмоточного вихретокового преобразователя со сменным защитным колпачком: 1 — измерительная $W_{иr}$, 2 — возбуждающая $W_{в}$ и 3 — компенсационная $W_{к}$ обмотки, 4 — ферритовый сердечник, 5 — защитный колпачок, 6 — корпус

Витки обмоток и ферритовый сердечник фиксируются вместе клеем, а удерживающие элементы соединяются с корпусом так, чтобы усилие нажатия на сердечник не передавалось обмоткам. Чувствительный элемент имеет близкие к минимальным технологически достижимые размеры. Ферритовый сердечник от истирания защищен сменным защитным колпачком, отлитым из стеклонаполненного полимера, с квазисферической контактной поверхностью. Элементы электронной схемы располагаются на печатной плате, также устанавливаемой внутри корпуса преобразователя.

Обмотка $W_{в}$ запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f . Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T_n)$ поступает на фазовый детектор ФД. Опорным сигналом для детектора служит напряжение $u_k(t)$ с выхода компенсационной обмотки $W_{к}$. Постоянное напряжение $U_{\Delta\phi}$ на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз $\Delta\phi$ между напряжениями $u_k(t)$ и $\Delta u(t, T_n)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Максимальная частота тока возбуждения $f_{\max} = 1,8$ МГц, погрешность измерения разности фаз не более $\pm 0,1^\circ$.

Для расчета параметров измерительного преобразователя удобно использовать обобщенный параметр β : $\beta = R(2\pi f \sigma \mu_0)^{1/2}$, где R — эквивалентный радиус обмотки возбуждения; σ — электропроводность материала; μ_0 — магнитная постоянная.

Конструкция чувствительного элемента на рис. 2 при указанном диаметре ферритового сердечника обеспечивает эквивалентный радиус

обмотки возбуждения $R \approx 1$ мм. Вариация T_n будет приводить к изменению σ_n и, соответственно, β . Для обеспечения приемлемой чувствительности величину β (σ_n) следует выбирать на уровне $\approx 5 \div 30$ [4].

В общем случае глубина проникновения вихревых токов δ , определяющая максимальную измеряемую толщину покрытия $T_{n \max}$ и минимальную толщину основания $T_{o \min}$, равна: $\delta = 1 / (\pi f \sigma \mu_0)^{1/2}$. В соответствии с [5] диапазон измерения $T_{n \max} = (0,6 \div 0,8) \delta$, а минимальная допустимая толщина основания $T_{o \min} = 2,5\delta$.

Отсюда следует, что оптимальное значение частоты преобразователя $f_{\text{опт}} \approx (0,36 \div 0,64) / (\pi \mu_0 \sigma_n T_{n \max}^2)$.

Для обеспечения оптимального β , значение эквивалентного радиуса R обмотки W_B необходимо выбирать из условия: $R = \beta / (2\pi f \sigma \mu_0)^{1/2}$.

При анализе характеристик преобразователей следует учесть влияние мешающих параметров:

- зазора h между преобразователем и покрытием;
- диаметра d основания в зоне измерения и его вариации;
- шероховатости R_z поверхности изделия;
- вариации электропроводности основания и покрытия.

Граничными задачами измерения являются следующие: 1) серебро/титан ($\sigma_n / \sigma_o \approx 60/2$); 2) золото/латунь ($\sigma_n / \sigma_o \approx 45/16$). При частоте тока возбуждения 1,8 МГц для рассматриваемых материалов глубина δ , мкм, проникновения вихревых токов будет следующей: для титана ≈ 265 , для латуни ≈ 94 , для золота ≈ 56 , для серебра ≈ 48 . Соответственно, обобщенные параметры β будут иметь значения приблизительно 5,3; 15,1; 25,3 и 29.

Напряжение на измерительной обмотке равно сумме напряжения \dot{U}_o , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого (разностного) напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$, возникающего вследствие влияния изделия с покрытием: $\dot{U} = \dot{U}_o + \dot{U}_{\text{вн}}$. Относительное вносимое напряжение определяется по формуле [4]:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{U}_{\text{вн}} / |\dot{U}_o| = (j\pi \mu_0 R_B R_{\text{и}} / M) \int_1 (\lambda R_B) J_1(\lambda R_{\text{и}}) e^{-\lambda |z_B + z_{\text{и}}|} \chi_0 d\lambda,$$

здесь $\chi_0 = [(\lambda - q_1)(q_1 + q_2) e^{Tnq_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1) e^{-Tnq_1}] / [(\lambda + q_1)(q_1 + q_2) e^{Tnq_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1) e^{-Tnq_1}]$; $q_i = (\lambda^2 + j\mu_0 \sigma_i \omega)^{1/2}$,

где T_n — толщина покрытия; R_B — радиус обмотки возбуждения; $R_{\text{и}}$ — радиус измерительной обмотки; $z_{\text{и}}$, z_B — расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия соответственно; $J_1(\lambda R_i)$ — функция Бесселя первого порядка; λ — параметр преобразования; $\sigma_i = \sigma_n$ — электропроводность покрытия; $\sigma_i = \sigma_o$ — электропровод-

ность основания; M — коэффициент начальной взаимоиндукции между обмотками; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота тока возбуждения.

При расчетах можно принять радиусы обмоток равными радиусу ферритового сердечника [3]. На рис. 3а представлена рассчитанная в соот-

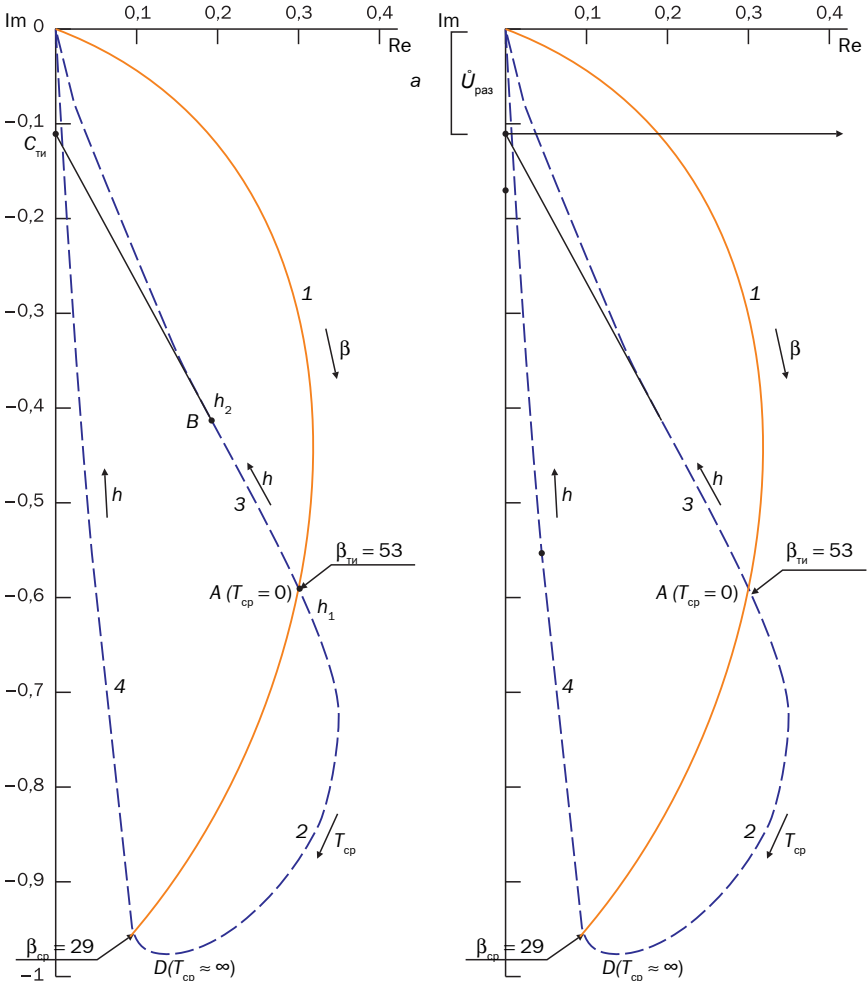


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ от измеряемого (T_{cp} — кривая 2), мешающего (h — кривые 3, 4) обобщенного (β — кривая 1) параметров: а — исходный годограф вектора $\dot{U}_{вн}^*$; б — годограф вектора $\dot{U}_{вн}^*$ со смещением точки начала координат на величину $U_{раз}$

ветствии с последней формулой зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ для граничной задачи серебро/титан (кривая 2). На этом же рисунке кривая 1 — годограф $\dot{U}_{вн}^*(\beta)$, кривые 3 и 4 — линии отвода $\dot{U}_{вн}^*(h)$. Амплитуда и фаза относительного вносимого напряжения определяется выражениями:

$$\dot{U}_{вн}^* = |\dot{U}_{вн}^*| = \{\text{Re} [\dot{U}_{вн}^*]^2 + \text{Im} [\dot{U}_{вн}^*]^2\}^{1/2}; \varphi = \text{arctg} \{\text{Im} [\dot{U}_{вн}^*] / \text{Re} [\dot{U}_{вн}^*]\}.$$

Основными мешающими параметрами при измерениях серебряных покрытий являются шероховатость R_z и диаметр d (кривизна) основания, а также их вариация. Этим параметрам можно поставить в соответствие эквивалентные зазоры h_3 между опорной поверхностью преобразователя

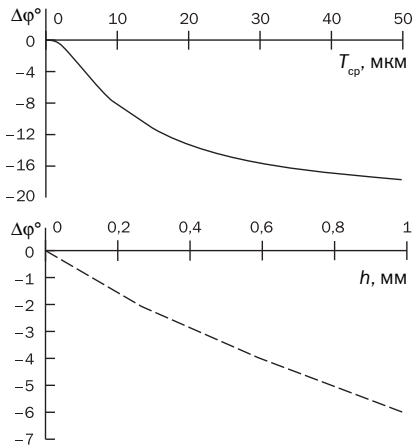


Рис. 4. Зависимость $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_{cp}) и мешающего (h) параметров

ля и покрытием [6]. Так, $d = 25$ мм соответствует $h_3 \approx 40$ мкм; $d = 10$ мм соответствует $h_3 \approx 100$ мкм. На рис. 4 представлены зависимости фазы $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ при изменении контролируемого (T_{cp}) и мешающего (h) параметров.

Из представленных графиков видно, что, например, изменение h на 0,3 мм вызовет сдвиг фазы $\Delta\varphi$ более чем на 2° . Если в качестве градуировочной характеристики преобразователя выступает зависимость $\Delta\varphi(T_{cp})$, то подобное изменение h может вызвать появление

дополнительной абсолютной погрешности измерения толщины серебряного покрытия до 4 мкм.

Из рис. 3а видно, что годограф $\dot{U}_{вн}^*(h)$ является практически прямой линией в некотором диапазоне изменения h (отрезок АВ). Если сместить точку начала координат в точку $C_{ти}$, то при изменении h на отрезке АВ будет изменяться только амплитуда вектора $\dot{U}_{вн}^*$. Использование фазы φ вносимого напряжения $\dot{U}_{вн}^*$ в качестве первичного информативного параметра позволяет исключить влияние изменения зазора h в определенном диапазоне на результат измерения. Соответствующая зависимость представлена на рис. 3б.

Смещение точки начала координат достигается разбалансировкой измерительной и компенсационной обмоток на требуемую величину

напряжения разбалансировки $\dot{U}_{\text{раз}}$ с помощью подстроечного резистора R_1 балансировочной схемы.

Очевидно, что чем меньше диапазон, в котором требуется осуществлять отстройку, тем более линейна зависимость $\dot{U}_{\text{вн}}^*(h)$, и тем меньше влияние на результат измерения толщины T_n будет оказывать девиация зазора h .

На рис. 5 представлены зависимости фазы $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ при изменении контролируемого (T_{cp}) и мешающего (h) параметров для четырех вариантов балансировок преобразователя. $\dot{U}_{\text{раз}}$ рассчитывалась для четырех диапазонов h : $[0...0,1]$, $[0...0,3]$, $[0...0,5]$ и $[0...1]$ мм.

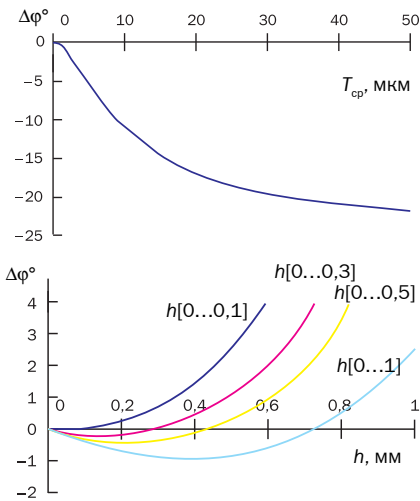


Рис. 5. Зависимость $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ при изменении контролируемого (T_{cp}) и мешающего (h) параметров при различных вариантах балансировки преобразователя

Максимальное изменение $\Delta\varphi$ наблюдается в середине диапазона, в котором осуществлялась отстройка. Так, в диапазоне $h [0...1]$ мм $\Delta\varphi_{\text{max}} = -0,9^\circ$ при $h = 0,4 \div 0,5$ мм, а в диапазоне $h [0...0,3]$ мм $\Delta\varphi_{\text{max}} = -0,2^\circ$ при $h = 0,15$ мм. При изменении балансировки преобразователя зависимость $\Delta\varphi(T_{\text{cp}})$ изменяется незначительно. При совмещении зависимости $\Delta\varphi(T_{\text{cp}})$ и $\Delta\varphi(h)$ видно, что балансировка преобразователя существенно снижает дополнительную погрешность измерения, обусловленную изменением h .

Например, при девиации зазора h в интервале от 0 до 0,3 при соответствующей балансировке максимальная дополнительная погрешность измерения толщины серебряного покрытия не превысит 0,5 мкм. Напомним, что при отсутствии соответствующей балансировки дополнительная погрешность измерения составляет 4 мкм.

Калибровка прибора (при необходимости) в процессе эксплуатации представляет процедуру установки чувствительности с использованием комплекта мер толщины покрытия/основания и установку нуля на образце реальной продукции без покрытия. Калибровка прибора может выполняться также на образцах продукции. Для этого вначале необхо-

димо изготовить образец толщины покрытия на изделии или на образце-свидетеле. Оптимальным для этих целей, по мнению авторов, является метод шарового микрошлифа [7], позволяющий измерять толщину покрытий с погрешностью не более $\pm 0,5$ мкм на плоских и криволинейных изделиях, в том числе малоразмерных.

Разработанные в соответствии с изложенным выше преобразователи в комплекте с прибором «Константа К6» (вариант гальванический) позволяют производить измерение толщины покрытий серебра, меди, золота и их сплавов с электропроводностью от 45 до 65 МСм/м на основаниях из цветных металлов с электропроводностью от 2 до 16 МСм/м. Минимальный диаметр оснований $d_{\text{мин}} = 2$ мм, максимальная шероховатость $R_{\text{zmax}} \approx 20$ мкм. Основная абсолютная допустимая погрешность измерения $\Delta T_{\text{п}}$ не более ± 2 мкм. Прибор может быть укомплектован соответствующим аттестованным набором мер толщины покрытий (рабочими эталонами второго разряда).

Литература

1. Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. — М.: Изд-во стандартов, 2004. — 264 с.
2. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий./ Научное, методическое, справочное пособие. — СПб.: Гуманистика, 2009. — 904 с.
3. Дорофеев А. Л., Никитин А. И., Рубин А. Л. Индукционная толщинометрия. — М.: Энергия, 1978. — 184 с.
4. Неразрушающий контроль/Справочник в 8 т. под общей ред. В. В. Клюева. Т. 2, книга 2: Вихретоковый контроль. — М.: Машиностроение, 2006. — 688 с.
5. ISO 21968. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials — Measurement of coatings thickness — Phase-sensitive eddy-current method.
6. Сясько В. А., Ивкин А. Е. Вихретоковая толщинометрия неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов. — Мир измерений. 2010. № 6. С. 18–23.
7. Randall N. Finer particle size allows better coating characterisation with the Calotest // Appl. Bulletin No. 5. URL: <http://www.csm-instruments.com/en/>