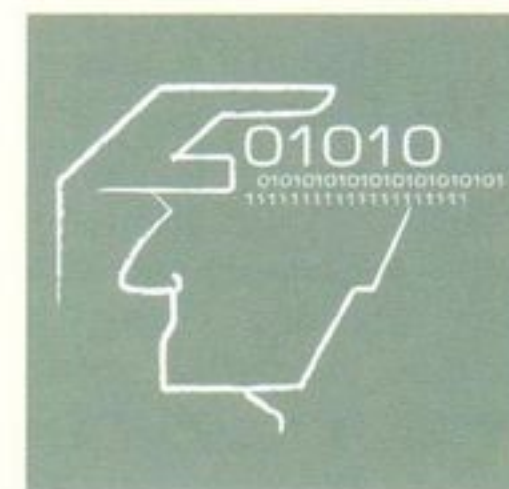


Measurement of Precious Metal Coating Thickness with Use of Eddy Current Testing

V. A. Syasko,
A. E. Ivkin

The article considers matters of eddy current phase thickness gauge development for measuring (with stray parameters suppression) of precious metal coating thickness on parts of non-ferromagnetic electro-conductive materials.



ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИХРЕТОКОВОГО ВИДА КОНТРОЛЯ

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 ро-

дия несколько ниже и лежит в диапазоне $\approx 45 \div 50$ МСм/м. Электропроводность оснований σ_0 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_0 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 неферромагнит-

ное покрытие толщиной T_n и электропроводностью σ_n на неферромагнитном электропроводящем основании электропроводностью σ_0 . Вихревые токи, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности σ_n объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, которая изменяется в зависимости от толщины покрытия T_n . Так, если $T_n = 0$, то $\sigma_n = \sigma_0$. При увеличении толщины покрытия от нуля до значения $T_n = \infty$ σ_n будет изменяться от σ_0 до σ_n [2].

Сотрудники ЗАО «Константа»,
Санкт-Петербург:



Сясько
Владимир Александрович
Генеральный директор, к. т. н.



Ивкин
Антон Евгеньевич
Ведущий специалист, аспирант НМСУ «Горный».

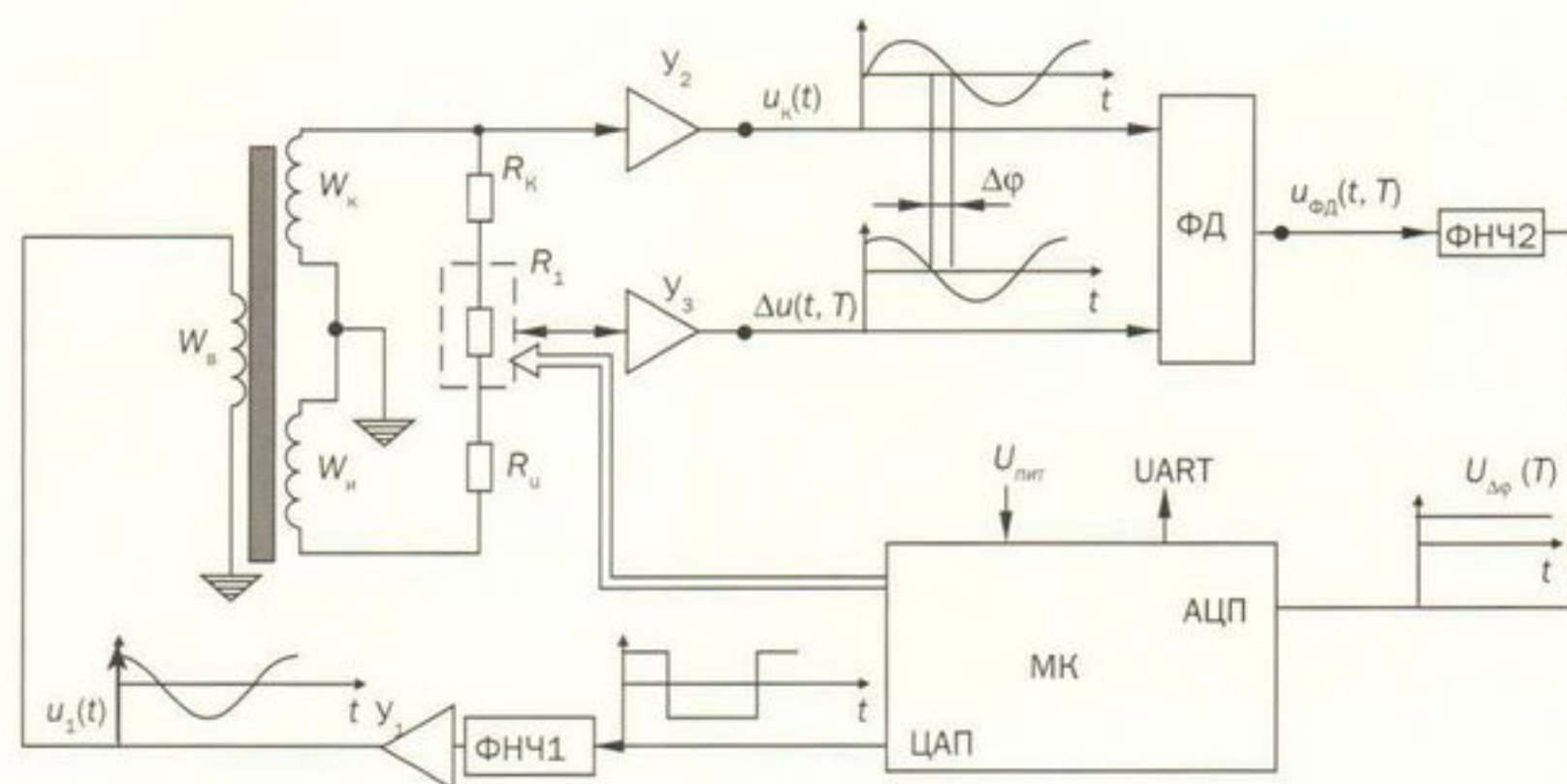


Рис. 1. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя: $Y_1 - Y_3$ — усилители, ФД — фазовый детектор, ФНЧ1 — ФНЧ2 — фильтры низкой частоты, W_n — обмотка возбуждения, W_k и W_n — дифференциально включенные компенсационная и измерительная обмотки, МК — микроконтроллер, R_1 — управляемый цифровой балансировочный потенциометр

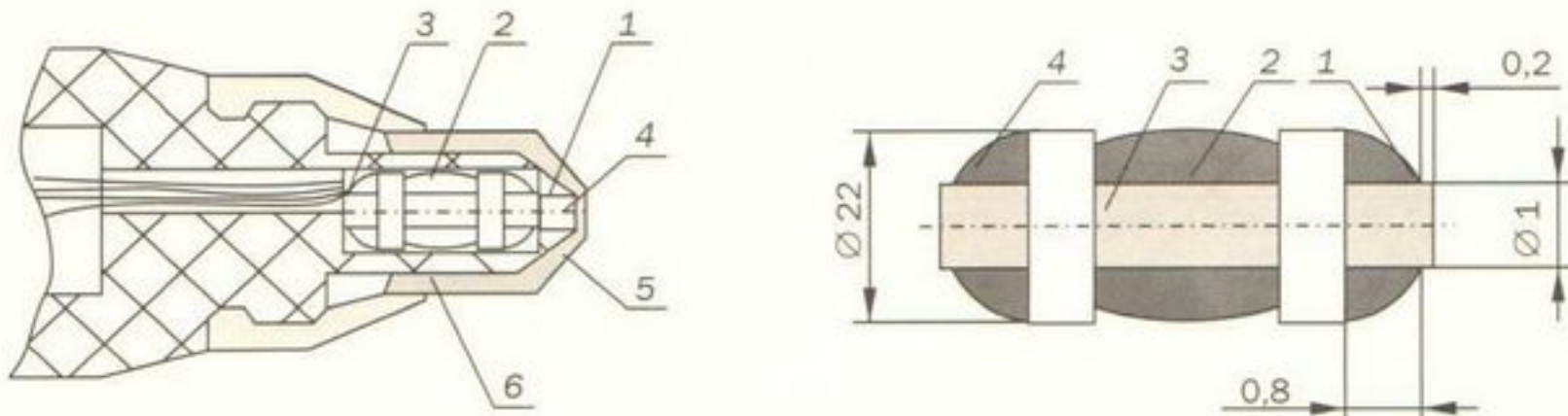


Рис. 2. Чувствительный элемент трансформаторного трехобмоточного вихретокового преобразователя со сменным защитным колпачком: 1 — измерительная $W_{\text{и}}$, 2 — возбуждающая $W_{\text{в}}$ и 3 — компенсационная $W_{\text{к}}$ обмотки, 4 — ферритовый сердечник, 5 — защитный колпачок, 6 — корпус

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.

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 достижимым размерам. Ферритовый сердечник от истирания защищен сменным защитным колпачком, отлитым из стеклонеполненного полимера, с квазисферической контактной поверхностью. Элементы электронной схемы располагаются на печатной плате, также устанавливаемой внутри корпуса преобразователя.

Обмотка $W_{\text{в}}$ запитывается синусоидальным напряжением $u_1(t)$ частоты f . Усиленное разностное (вносимое) напряжение $\Delta u(t, T_n)$ поступает на фазо-

вый детектор ФД. Опорным сигналом для детектора служит напряжение $u_{\text{к}}(t)$ с выхода компенсационной обмотки $W_{\text{к}}$. Постоянное напряжение $U_{\Delta\varphi}$ на выходе фильтра низкой частоты пропорционально разности фаз $\Delta\varphi$ между напряжениями $u_{\text{к}}(t)$ и $\Delta u(t, T_n)$. Балансировка обмоток преобразователя производится с использованием цифрового потенциометра, управляемого микроконтроллером.

Максимальная частота тока возбуждения $f_{\text{max}} = 1,8$ 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 $\sigma_{\text{н}}$ и, соответственно, β . Для обеспечения приемлемой чувствительности величину $\beta(\sigma_{\text{н}})$ следует выбирать на уровне $\approx 5 \div 30$ [4].

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

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

Для обеспечения оптимального β , значение эквивалентного радиуса R обмотки $W_{\text{в}}$ 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 ($\sigma_{\text{н}}/\sigma_0 \approx 60/2$); 2) золото/латунь ($\sigma_{\text{н}}/\sigma_0 \approx 45/16$). 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}_0 , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого (разностного) напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$, возникающего вследствие влияния изделия с покрытием: $\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}$. Относительное вносимое напряжение определяется по формуле [4]:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \dot{U}_{\text{вн}} / |\dot{U}_0| = (j\pi\mu_0 R_{\text{в}} R_{\text{и}} / M) \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_{\text{в}}) J_1(\lambda R_{\text{и}}) e^{-\lambda(z_{\text{в}} + z_{\text{и}})} \chi_0 d\lambda,$$

$$\chi_0 = [(\lambda - q_1)(q_1 + q_2) e^{T_n q_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1) e^{-T_n q_1}] / [(\lambda + q_1)(q_1 + q_2) e^{T_n q_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1) e^{-T_n q_1}];$$

$$q_1 = (\lambda^2 + j\mu_0 \sigma_1 \omega)^{1/2},$$

где T_n — толщина покрытия; $R_{\text{в}}$ — радиус обмотки возбуждения; $R_{\text{и}}$ — радиус измерительной обмотки; $z_{\text{и}}$, $z_{\text{в}}$ — расстояние от измерительной обмотки и обмотки возбуждения до поверхности изделия соответственно; $J_1(\lambda R_i)$ — функция Бесселя первого порядка; λ — параметр преобразования; $\sigma_1 = \sigma_{\text{н}}$ — электропроводность покрытия; $\sigma_0 = \sigma_0$ — электропроводность основания; M — коэффициент начальной взаимной индукции 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 соответствии с последней формулой зависимость комплексного относительного вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}^*$ для граничной задачи серебро/титан (кривая 2). На этом же рисунке кривая 1 — годограф $\dot{U}_{\text{вн}}^*(\beta)$, кривые 3 и 4 — линии отвода $\dot{U}_{\text{вн}}^*(h)$. Амплитуда и фаза относительного вносимого напряжения определяется выражениями:

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

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

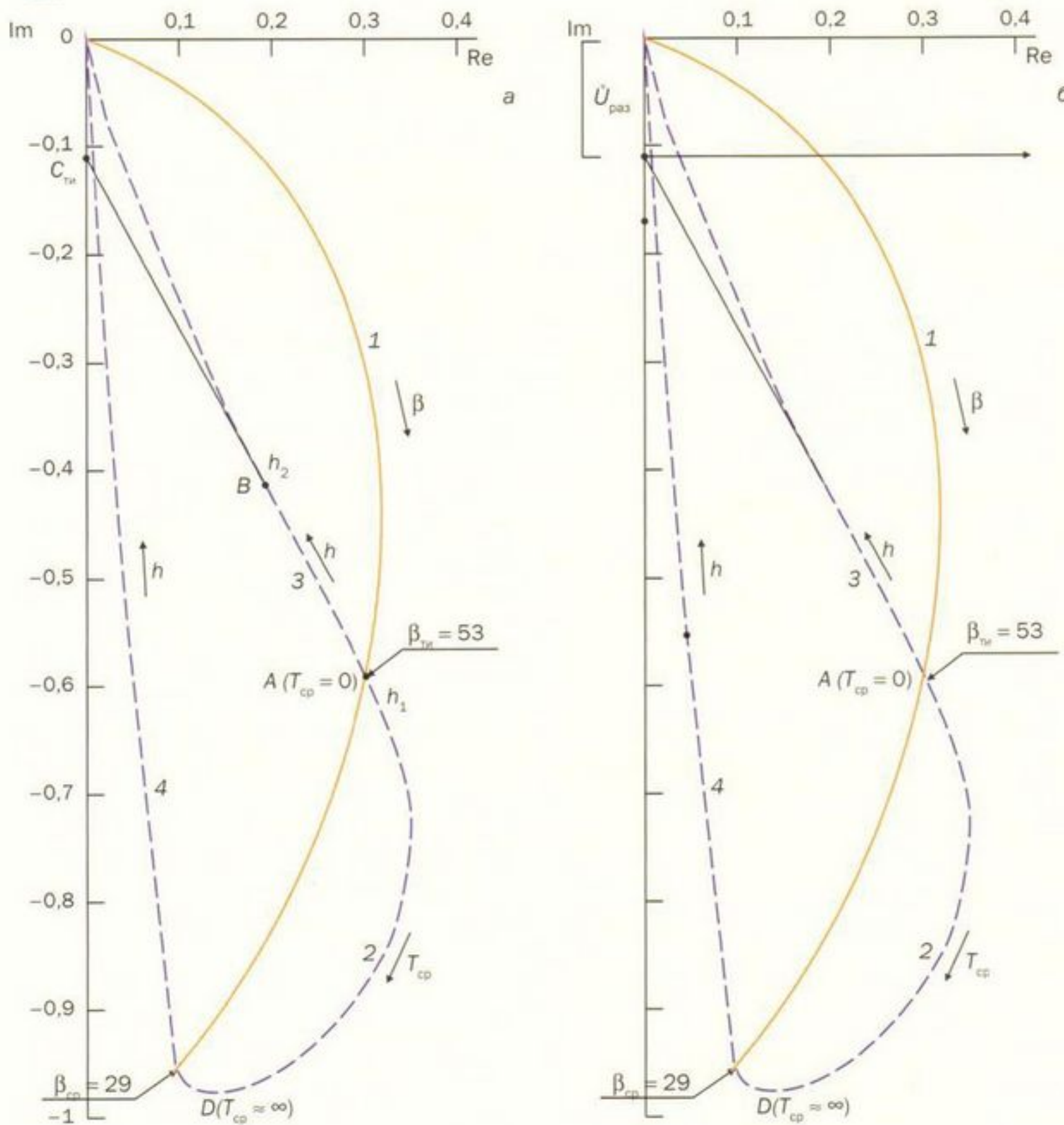


Рис. 3. Зависимость комплексного вносимого напряжения \dot{U}^* от измеряемого (T_{cp} — кривая 2), мешающего (h — кривые 3, 4) обобщенного (β — кривая 1) параметров: а — исходный годограф вектора \dot{U}^* ; б — годограф вектора \dot{U}^* со смещением точки начала координат на величину $U_{раз}$

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 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}^* 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 $\dot{U}^*(h)$ 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}^* . Использование фазы φ вносимого напряжения \dot{U}^* 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 $\dot{U}_{раз}$ с помощью подстроечного резистора R_1 балансирующей схемы.

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

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

Максимальное изменение $\Delta\varphi$ наблюдается в середине диапазона, в котором осуществлялась отстройка. Так, в диапазоне h [0...1] мм $\Delta\varphi_{max} = -0,9^\circ$ при $h = 0,4 \div 0,5$ мм, а в диапазоне h [0...0,3] мм $\Delta\varphi_{max} = -0,2^\circ$ при $h = 0,15$ мм.

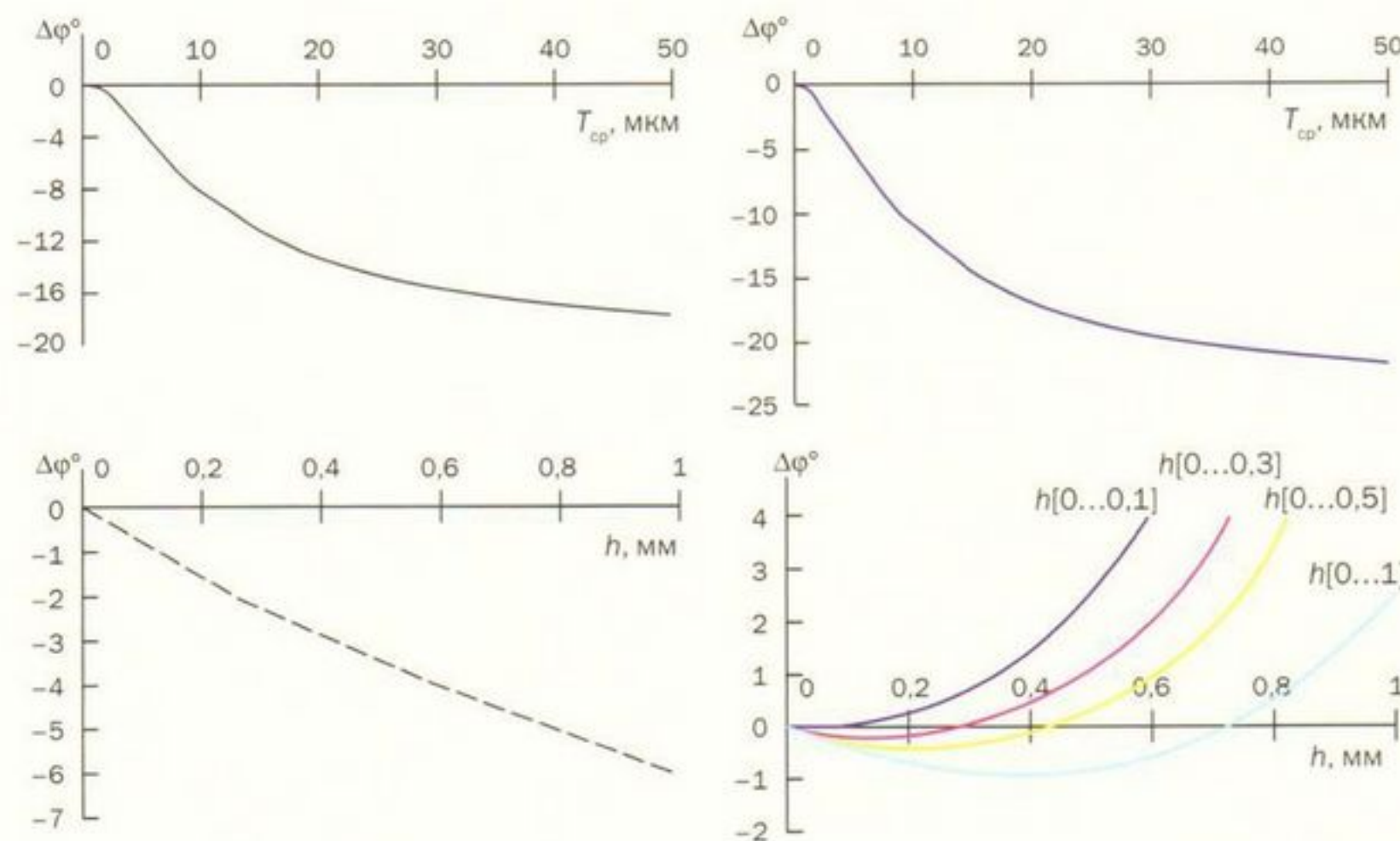


Рис. 4. Зависимость $\Delta\varphi$ вносимого напряжения \dot{U}^* при изменении контролируемого (T_{cp}) и мешающего (h) параметров

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

При изменении балансировки преобразователя зависимость $\Delta\varphi(T_{cp})$ изменяется незначительно. При совмещении зависимости $\Delta\varphi(T_{cp})$ 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 необходимо 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 $d_{\min} = 2$ мм, максимальная шероховатость $R_{z\max} = 20$ мкм. Основная абсолютная допустимая погрешность измерения ΔT_n 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 ферромагнитных 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/>

Статья получена 7 июня 2012 г.

КОНСТАНТА®

КОМПЛЕКТЫ МЕР ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ПОКРЫТИЙ ВСЕХ ТИПОВ



ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ТОЛЩИНОМЕР
ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ВСЕХ ТИПОВ

КОНСТАНТА К6

198095, Санкт-Петербург, а/я 42, тел./факс (812) 372-29-03, 372-29-04

на правах рекламы