

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МАГНИТНЫМИ И ВИХРЕТОКОВЫМИ МЕТОДАМИ В УСЛОВИЯХ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

**В. А. СЯСЬКО, А. Е. ИВКИН**

ЗАО «Константа», С.-Петербург, Россия, e-mail: office@constanta.ru

*Представлен анализ факторов, определяющих метрологические характеристики магнитоиндукционных и вихретоковых толщиномеров защитных металлических покрытий и достоверность результатов измерений с их использованием в условиях машиностроительных производств.*

**Ключевые слова:** *металлическое покрытие, толщина, магнитоиндукционный и вихретоковый толщиномер, достоверность результатов измерений.*

*The analysis of factors determining metrological characteristics of magneto-inductive and eddy current thickness measuring instruments for protective metal coatings and the confidence of measurements results in mechanical engineering production is presented.*

**Key words:** *metal coating, thickness, magneto-inductive and eddy current thickness measuring instrument, measurement results confidence.*

В России традиционно уделяется большое внимание вопросам метрологического обеспечения измерения толщины покрытий, в том числе металлических, большая часть которых имеет высокую стоимость и малую толщину  $h = 2 \dots 20$  мкм [1]. На отечественном рынке представлена большая номенклатура отечественных и зарубежных электромагнитных толщиномеров металлических покрытий [2]. В руководстве по эксплуатации для каждого преобразователя, входящего в состав прибора, должны обязательно оговариваться типы контролируемых покрытий и оснований, предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерений, диапазон измерений  $h_{\max}$ , минимальные вну-

тренний и наружный радиусы изделий, диаметр зоны измерения и допускаемая шероховатость  $R_{z\max}$  основания (покрытия), рабочий температурный диапазон.

В настоящее время у большинства ведущих производителей появились толщиномеры металлических покрытий с заявляемым пределом допускаемой основной абсолютной погрешности измерения  $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$  мкм в области малых толщин. При этом подразумевается, что испытания приборов проводят на образцовых основаниях и рабочих эталонах (мерах толщины покрытий), идентичных тем, на которых определяли градуировочную характеристику в нормальных условиях [3]. Это может вводить неподготовленных пользователей в заблуждение относительно достоверности результатов измерения в производственных условиях.

Проанализируем соответствие заявляемых и реально обеспечиваемых (достижимых) метрологических характеристик толщиномеров защитных металлических покрытий в производственных условиях.

Метрологические характеристики толщиномеров определяются методом измерений, построением измерительных преобразователей, используемыми алгоритмами преобразования и вычисления  $h$  по градуировочной характеристике. Существенное влияние оказывают мешающие параметры [4], действующие на измерительные преобразователи в процессах градуировки, калибровки и измерений. К таким геометрическим параметрам относятся: толщина основания  $T$ , диаметр зоны измерения  $D$ , радиус кривизны  $r$  и шероховатость  $R_z$  поверхности, зазор  $Z$  между преобразователем и покрытием. Физические мешающие параметры включают: электропроводности  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и относительные магнитные проницаемости  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  покрытия и основания, температуру  $t$ , внешние электромагнитные поля и др.

#### **Воздействие геометрических мешающих параметров**

*Шероховатость и кривизна поверхности.* Вихретоковые фазовые преобразователи обеспечивают отстройку от размера зазора  $Z$  при измерении, что практически полностью исключает влияние девиации  $r$  и  $R_z$  до значения порядка 40 мкм [2].

Для магнитоиндукционных и вихретоковых частотных преобразователей дополнительная погрешность измерения толщины металлических покрытий зависит от  $Z$  и эквивалентного зазора  $Z^*$ , обусловленного радиусом изделия  $r$ . При их использовании в процессе измерения на основаниях с регулярной шероховатостью при нормальном распре-

делении значения толщины составляют  $6S=R_z/2,5$ , где  $S$  – стандартное отклонение для нормального закона распределения. Например, при  $R_z \approx 5$  мкм разброс результатов измерения будет порядка  $\pm 1$  мкм.

При измерении покрытий в области малых толщин покрытий на цилиндрических изделиях радиусом  $r$  дополнительная погрешность измерений  $\Delta(r)$  носит аддитивный характер. Для преобразователей с диаметром зоны измерения  $D = 1,5 \dots 3$  мм погрешность  $\Delta hr \approx (200 \dots 220) r^{-1,07}$ , где  $r$  измеряется в миллиметрах,  $\Delta h(r)$  – в микрометрах. Например, при изменении  $r$  от 10 до 7,5 мм значение  $\Delta h(r)$  изменится с 9 до 12 мкм [5].

**Диаметр зоны измерения и краевой эффект.** Чувствительные элементы первичных преобразователей проектируются с внешними экранами из магнитомягких сталей для магнитоиндукционных преобразователей и высокочастотных ферритов для вихретоковых преобразователей. При этом можно утверждать, что  $D$  практически равен диаметру экрана преобразователя, а минимальное расстояние от экрана до края плоского изделия, при котором не возникает дополнительной погрешности, можно считать равным  $(0,1 - 0,2)D$ .

**Толщина основания.** Одной из главных характеристик основания является его минимальная толщина  $T_{\min}$ , не влияющая на результат измерения. Для высокочастотных вихретоковых преобразователей  $T_{\min} \approx 2,5(\pi f \mu_0 \sigma_2)^{-2}$ , где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\sigma_2$  – электропроводность объекта контроля;  $f$  – частота возбуждения преобразователя [2]. Для низкочастотных магнитоиндукционных преобразователей  $T_{\min} \approx (0,3 \dots 0,4)D$  [6].

### Воздействие физических мешающих параметров

**Электропроводность основания и покрытия при измерении электропроводящих неферромагнитных покрытий на идентичных основаниях.** Вихретоковые частотные преобразователи выполняют по автогенераторной схеме, их выходная частота зависит от вносимой индуктивности [7]:

$$L_{\text{вн}} = \text{Im} \left[ j\pi\mu_0 R^2 n^2 \int_0^{\infty} J_1(\lambda R)^2 e^{-2\lambda z} \chi_0 d\lambda \right] / (\omega L_0);$$

$$\chi_0 = \frac{(\lambda - q_1)(q_1 + q_2)e^{hq_1} - (\lambda + q_1)(q_2 - q_1)e^{-hq_1}}{(\lambda + q_1)(q_1 + q_2)e^{hq_1} - (\lambda - q_1)(q_2 - q_1)e^{-hq_1}}; \quad (1)$$

$$q_i = \sqrt{\lambda^2 + j\omega\mu_0\sigma_i}, \quad i = 1, 2,$$

где  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $R$  – эквивалентный радиус обмотки преобразователя;  $n$  – число ее витков;  $J_1(\lambda R)$  – функция Бесселя 1-го порядка;  $\lambda$  – параметр преобразования;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота тока возбуждения;  $L_0$  – начальная индуктивность преобразователя;  $\sigma_1, \sigma_2$  – электропроводности покрытия и основания.

Разброс электропроводности основания реальной продукции из цветных металлов может достигать  $\Delta\sigma_2 \approx \pm(0,05 \dots 0,1)\sigma_2$  [1]. В соответствии с (1) для металлов и сплавов с электропроводностью 9 – 60 МСм/м при  $h < 20$  мкм и  $R \approx 1,5$  мм это приведет к разбросу вносимой индуктивности порядка  $\Delta L_{\text{вн}} \approx \pm(0,012 \dots 0,025)L_{\text{вн}}$ . Отсюда погрешность измерения толщины металлических покрытий будет достигать  $\Delta h(\sigma) \approx \pm 1,2$  мкм для  $\sigma_2 \approx 60$  МСм/м и  $\Delta h(\sigma) \approx \pm 2$  мкм для  $\sigma_2 \approx 9$  МСм/м. Проведенные экспериментальные исследования для покрытий с различным отношением  $\sigma_1/\sigma_2$  подтвердили полученные выше результаты [3].

Вихретоковые фазовые преобразователи в большинстве случаев выполняют по трехобмоточной схеме с дифференциальным включением измерительной и компенсационной обмоток. С помощью вихретоковых фазовых толщиномеров возможно проведение измерений при  $\sigma_1 \gg \sigma_2$  (например, медь или серебро на латуни).

Напряжение на измерительной обмотке представим в виде суммы напряжения  $\dot{U}_0$ , возникающего в отсутствие контролируемого изделия, и вносимого напряжения  $\dot{U}_{\text{вн}}$ , обусловленного влиянием контролируемого изделия [7]:  $\dot{U} = \dot{U}_0 + \dot{U}_{\text{вн}}$ .

Относительное вносимое напряжение измерительной обмотки определяется по формуле [7]:

$$\dot{U}_{\text{вн}}^* = \frac{j\pi R_{\text{в}} R_{\text{и}} \mu_0}{M} \int_0^{\infty} J_1(\lambda R_{\text{в}}) J_1(\lambda R_{\text{и}}) e^{-\lambda(z_{\text{в}} + z_{\text{и}})} \chi_0 d\lambda, \quad (2)$$

где  $R_{\text{в}}, R_{\text{и}}$  – радиусы обмоток возбуждения и измерительной;  $z_{\text{в}}, z_{\text{и}}$  – расстояния от указанных обмоток до поверхности изделия;  $M$  – коэффициент начальной взаимной индукции между обмотками.

Фаза относительного вносимого напряжения выражается как

$$\varphi = \text{arctg} \left( \text{Im}[\dot{U}_{\text{вн}}^*] / \text{Re}[\dot{U}_{\text{вн}}^*] \right). \quad (3)$$

Проведенные по (2), (3) расчеты показывают, что изменение электропроводности основания  $\sigma_2 \approx 10$  МСм на  $\pm 1$  МСм/м приводит к возникновению погрешности измерения толщины медного или серебряного покрытия ( $\sigma_1 \approx 60$  МСм) порядка  $\Delta h(\sigma) \approx \pm(1,5...2)$  мкм при измеряемых толщинах покрытия до  $h = 30$  мкм.

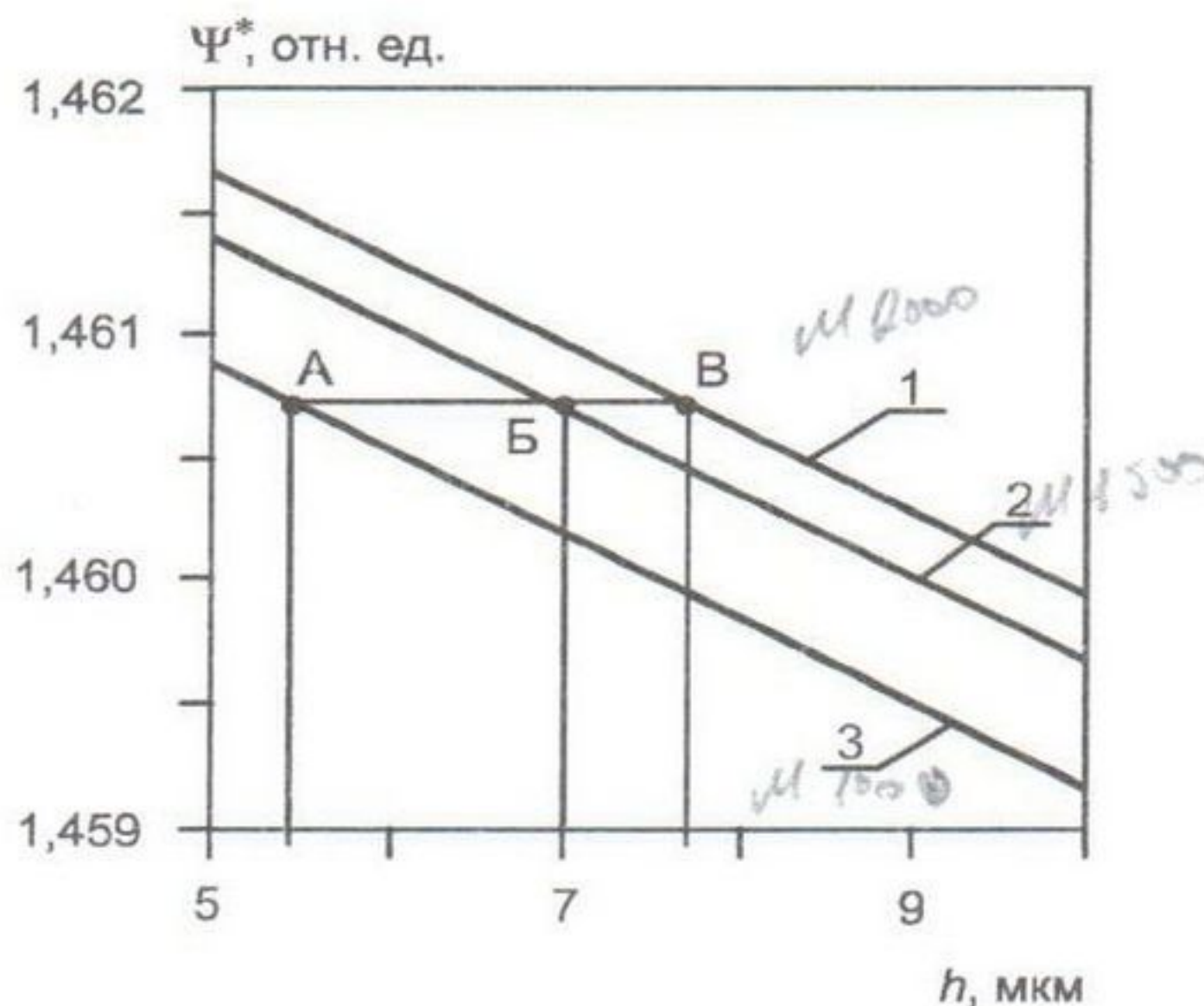
*Магнитная проницаемость основания при измерении электропроводящих неферромагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях.* Информативный параметр магнитоиндукционных двухобмоточных трансформаторных преобразователей – изменение потокосцепления  $\Psi(h)$ , пронизывающего измерительную (вторичную) обмотку, обратно пропорциональное  $h$  и прямо пропорциональное  $\mu_2$  (погрешность измерения не зависит от электропроводности основания и покрытия) [6]:

$$\Psi(h) = \Psi_0 + \Psi_{\text{вн}}(h),$$

где  $\Psi_0$  – потокосцепление при  $h = \infty$ ;  $\Psi_{\text{вн}}(h)$  – вносимое потокосцепление.

Для сталей характерен локальный разброс магнитных свойств. При этом разброс относительной магнитной проницаемости  $\mu_2$  оснований для сталей, подвергнутых закалке и механической обработке больше, чем для магнитомягких сталей. Для последних разброс  $\mu_2$  в пределах образца диаметром около 50 мм может достигать 10 – 20 %. В случае легированных сталей, подвергшихся закалке и шлифовке, разброс  $\mu_2$  может составлять 40 – 80 % [1].

Чтобы изучить влияние  $h$  и  $\mu_2$  на потокосцепление малогабаритных преобразователей, рассчитывали этот параметр измерительной обмотки методом конечных элементов [2]. На рисунке представлена зависимость  $\Psi^*(h) = (\Psi_0 + \Psi_{\text{вн}}(h)) / \Psi_0$  в области малых толщин для пре-



Пример зависимости относительного потокосцепления от толщины стального основания при его различной относительной магнитной проницаемости:

2000 (1); 1500 (2); 1000 (3)

образователя с диаметром зоны измерения  $D = 3$  мм при различных  $\mu_2$ . Локальный разброс магнитных свойств в области  $\pm 50\%$  относительно среднего значения приведет к девиации показаний от  $-1,5$  до  $+0,7$  мкм. При меньших  $\mu_2$  для легированных сталей этот разброс будет существенно больше (в зависимости от марки материала от 1,5 до 4 мкм).

**Температура.** В большинстве случаев для толщиномеров защитных покрытий в руководстве по эксплуатации оговаривается температура эксплуатации от  $-10$  до  $+40$  °С. Изучали влияние температуры для толщиномеров ведущих отечественных и зарубежных производителей в диапазоне от  $-20$  до  $+40$  °С. В области малых толщин покрытий получили коэффициенты дополнительной составляющей погрешности  $\Delta h(t)$ , обусловленной влиянием температуры, для толщиномеров: «Константа К5» (Россия) –  $0,06$  мкм/°С, «Elcometer 456» (Англия) –  $0,13$  мкм/°С и «Positector 600» (США) –  $0,38$  мкм/°С. Это означает, что при изменении температуры на  $10$  °С значение  $\Delta h(t)$  составит примерно  $0,6$  мкм – для «Константа К5»,  $1,3$  мкм – для «Elcometer 456»,  $4$  мкм – для «Positector 600».

**Внешние электромагнитные поля.** Их источником являются силовые агрегаты (наводки частотой 50 и 100 Гц), преобразователи электроприводов (импульсные наводки частотой до единиц килогерц) и коммуникационное оборудование (высокочастотные наводки). В зоне действия полей девиация показаний может превышать допустимую абсолютную погрешность измерений. Уменьшение их влияния достигается только проведением измерений с усреднением.

### **Представление градуировочной характеристики**

Градуировочная характеристика преобразователей толщиномеров имеет вид функции, автоматически рассчитываемой по кодам  $N(h)$ , снимаемым на мерах толщины покрытий.

Чтобы обеспечить  $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$  мкм, градуировочную характеристику оптимально аппроксимировать полиномом  $N(h) = kh^3 + mh^2 + nh + p$  по группам из четырех точек в пределах общего числа точек. Значения мер толщины для получения характеристики следует выбирать из ряда 0; 5 – 10; 16 – 20; 30; 40; 60; 80; 100; 125; 150; 175; 200; 250 мкм. В этом диапазоне коэффициенты  $k$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $p$  рассчитывают для четырех групп. При этом в области малых толщин погрешность аппроксимации  $\Delta h_a$  будет пренебрежимо мала. Соответственно, при доверительной вероятности  $P = 0,99$  в области малых

толщин при  $\Delta h \leq \pm 1$  мкм меры толщины покрытий для градуировки должны быть изготовлены и аттестованы с погрешностью на уровне  $\pm 0,3$  мкм.

### **Градуировка и поверка преобразователей в составе толщиномеров**

Преобразователи в области малых толщин чаще всего градуируются на мерах толщины покрытий из металлических материалов (рабочих эталонах 2-го разряда [3]) в нормальных условиях. В качестве таких эталонов применяют меры толщины покрытий в диапазоне 2 – 1000 мкм. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей изготовления и аттестации рабочих эталонов 2-го разряда в соответствии с [3]:  $\Delta h_{pэ} \leq \pm((0,1 \dots 0,3) + 0,025h)$  мкм. Основание меры должно иметь толщину больше  $T_{\min}$ . В настоящее время для аттестации ступенчатых мер толщины покрытий чаще всего используют оптиметрический или профилографический методы, обеспечивающие погрешность измерения на уровне  $\pm(0,1 - 0,2)$  мкм в области малых толщин, что допустимо.

Иногда, в силу ряда причин не представляется возможным изготовление металлических мер толщины по [6], так как их характеристики не будут соответствовать реальным. В этой ситуации меры толщины производят из образцов реальной продукции по технологии изготовления шлифов согласно [8] или по методу шара [9]. В последнем случае погрешность измерения малых толщин  $\Delta h_{ш} \leq \pm(0,1 \dots 0,3)$  мкм. Метод шара применим также для рабочих эталонов 2-го разряда. Его преимущество в том, что отсутствуют требования к плоскопараллельности сторон оснований, необходимой в случае использования оптиметров. Физические характеристики материалов мер толщины покрытий и оснований следует выбирать в соответствии с методом измерения, применяемом в конкретном толщиномере.

При изготовлении металлических мер для магнитоиндукционных и вихретоковых фазовых толщиномеров перед нанесением покрытий следует тщательно отобрать полированные стальные основания. Основания толщиной больше  $T_{\min}$  должны иметь девиацию  $\mu_{отн} = \mu/\mu_{\max}$ , обеспечивающую в диапазоне малых толщин разброс показаний «нуля» не более  $\pm(0,1 - 0,3)$  мкм. Меры толщины должны быть размагничены.

При изготовлении металлических мер толщины для вихретоковых частотных и фазовых толщиномеров в качестве оснований можно использовать цветные металлы, требующие ручной доводки. Основания толщиной больше  $T_{\min}$ , отобранные для изготовления мер, должны иметь разброс  $\sigma_2$  не более  $\pm(0,3 - 0,5)$  МСм/м. Покрытия необходимо нано-

силь в свежеприготовленном электролите по технологиям, соответствующим применяемым в производстве, где будет эксплуатироваться прибор.

В процессах градуировки и поверки следует выдерживать постоянную температуру образцов  $t = (20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ , а также обеспечивать возможно минимальный уровень электромагнитных полей.

Выполнение указанных условий изготовления и аттестации эталонных мер толщины, аппроксимации градуировочной характеристики и условий градуировки обеспечит  $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$  мкм в области малых толщин в нормальных условиях.

Исследование среднего ресурса металлических мер толщины покрытий путем их многократных измерений магнитоиндукционным толщиномером показало, что до 3000 – 5000 измерений характеристики металлических покрытий практически не изменяются.

Поверку толщиномеров желательно проводить на мерах толщины, аналогичных мерам, которые были использованы для их градуировки при изготовлении.

#### **Калибровка и проведение измерений**

Согласно [6] толщиномеры калибруют с помощью рабочих средств измерений – мер толщины покрытий с различными сочетаниями материалов оснований и покрытий, сгруппированных по назначению, с пределом допускаемой абсолютной погрешности изготовления  $\Delta h_{\text{РСИ}} \leq \pm ((0,2 \dots 0,3) + 0,05h)$  мкм.

Для калибровки магнитоиндукционных толщиномеров в области малых толщин часто применяют имитаторы покрытий – пленки из полиэтилентерафталата, накладываемые на образцы изделий без покрытия. Минимальные толщины имитаторов на основе полиэтиленовых пленок составляют порядка 5 – 10 мкм. Отбором пленок можно обеспечить изготовление имитаторов с разбросом не более  $\pm 0,3$  мкм толщины по зоне диаметром около 6 – 10 мм. Чтобы исключить влияние износа пленок их необходимо заменять после проведения 30 – 200 измерений (в зависимости от толщины имитатора).

При измерении толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на ферро- и неферромагнитных основаниях с помощью вихретоковых преобразователей количество мер толщины для калибровки может быть неоправданно большим. В настоящее время ведущие производители решают данную проблему следующим образом. В преобразователь встраивают энергонезависимую память, в которую записывают градуировочные характеристики «покрытие–основание», снимаемые на рабочих эталонах 2-го разряда. Погрешность  $\Delta h$  практически аддитивно зависит от влияния параметров основания в области



малых толщин и устраняется установкой «нуля» на образце изделия без покрытия [3].

В процессе калибровки и измерений на измерительный преобразователь воздействуют практически все влияющие факторы, определяемые параметрами покрытия, основания и условиями внешней среды. С учетом сказанного выше для магнитоиндукционных и вихретоковых фазовых толщиномеров локальный разброс  $\mu_2$  основания вызывает разброс показаний порядка  $\pm(1 - 3)$  мкм в области малых толщин; изменение температуры на  $10^\circ\text{C}$  может привести к погрешности измерения на уровне  $0,5 - 3$  мкм; износ имитаторов может обусловить неконтролируемую погрешность при калибровке. Для вихретоковых частотных и фазовых толщиномеров большое влияние на результат измерений оказывает разброс оснований  $\sigma_1$  и покрытий  $\sigma_2$  (возможно до  $\pm(1 - 2)$  мкм). Для уменьшения влияния вариаций  $\sigma_2$ ,  $\mu_2$  и  $R_2$  рекомендуется выполнять калибровку и измерения с усреднением результатов по зоне контроля или по партии изделий.

*Заключение.* Выпускаемые в настоящее время и используемые в промышленности толщиномеры покрытий не могут обеспечить заявленную в руководстве по эксплуатации погрешность измерения  $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$  мкм в условиях технологических разбросов физических и геометрических параметров изделий и внешней среды большинства машиностроительных производств.

Для проведения ежегодной поверки в области малых толщин сертифицированные метрологические службы должны быть укомплектованы мерами толщины покрытий требуемых сочетаний материалов покрытий и оснований – рабочими эталонами 2-го разряда, изготавливаемыми по единой технологии согласно конструкторской документации, соответствующей контролируемым объектам.

Выполнение измерений с усреднением по заданной зоне контроля или в пределах определенного количества изделий при указанных мешающих параметрах позволяет получить значение толщины, характеризующее технологический процесс нанесения покрытия с подавлением примерно в  $\sqrt{n}$  раз разброса показаний, обусловленного мешающими параметрами. При  $n = 10 \dots 15$  можно говорить о возможности проведения измерений технологической толщины металлических покрытий для рассмотренных методов измерения с  $\Delta h \leq \pm 2$  мкм в области малых толщин с доверительной вероятностью  $P = 0,95 \dots 0,99$ , что подтверждается опытом эксплуатации приборов.

Перед началом эксплуатации необходимо провести испытания приборов для определения температурной и временной стабильности их

показаний, по результатам которых регламентируется периодичность калибровки при работе в цеховых условиях.

Технологические допуски на толщину покрытия нельзя назначить исходя из указываемых в рекомендациях по эксплуатации большинства современных толщиномеров значений  $\Delta h \leq \pm(0,01h + 1)$  мкм в области малых толщин, так как они не будут обеспечены с требуемой доверительной вероятностью. При установлении допусков необходимо провести исследование мешающих параметров и учесть их влияние и только после этого разработать методику выполнения измерений и определить необходимую доверительную вероятность для допусков на толщину покрытия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л.** Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. М.: Изд-во стандартов, 2004.
2. **Потапов А. И., Сясько В. А.** Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий /Науч., метод., справ. пособие. СПб.: Гуманистика, 2009.
3. **Р 50.2.006–2001.** Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. Рекомендации по метрологии.
4. **ГОСТ 24289–80.** Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
5. **Сясько В. А., Ивкин А. Е.** Вихретоковая толщинометрия неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов //Мир измерений. 2010. № 6. С. 18–23.
6. **Неразрушающий контроль:** Справочник в 7-ми т. /Под ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2003.
7. **Неразрушающий контроль:** Справочник в 8-ми т. /Под ред. В. В. Клюева. Т. 2. Кн. 2. Вихретоковый контроль. М.: Машиностроение, 2006.
8. **ГОСТ 9.032–88.** Покрытия металлические и неметаллические органические.
9. **Randall N.** Finer particle size allows better coating characterisation with the Calotest // Application Bulletin № 5 [Электрон. ресурс]. <http://www.csm-instruments.com/en/> (дата обращения: 01.11.2010).

*Дата принятия 06.12.2010 г.*