

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ВИХРЕТОКОВЫМ ФАЗОВЫМ МЕТОДОМ



ГОЛУБЕВ Сергей Сергеевич

Канд. техн. наук, заместитель руководителя Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии, Москва



СЯСЬКО Владимир Александрович

Д-р. техн. наук, генеральный директор ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург



СМИРНОВА Надежда Игоревна

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»), ведущий специалист ООО «КОНСТАНТА», Санкт-Петербург

Рассмотрены проблемы обеспечения достоверности при измерении толщины защитных и функциональных металлических покрытий, все шире применяемых в авиакосмическом комплексе. Для вихретокового фазового метода измерения рассмотрены контролируемые и мешающие параметры, получены зависимости, описывающие их влияние на точность измерений толщины при градуировке, поверке и калибровке. Сформулированы требования к электрофизическим параметрам мер толщины металлических покрытий и приведен проект схемы обеспечения прослеживаемости для средств измерений толщины металлических покрытий, реализующих вихретоковый фазовый метод измерения.

Защитные и функциональные металлические покрытия широко применяются в авиакосмическом комплексе. В настоящее время используется множество различных технологий нанесения, активно внедряются многослойные покрытия. Одним из важных параметров качества покрытия является его толщина T_n , отклонение которой от заданного значения может привести к выходу из строя изделия, что повышает вероятность аварии или катастрофы. В связи с этим возрастают требования к контролю толщины покрытий.

Для измерения толщины металлических покрытий широко используют вихретоковые толщиномеры, реализующие фазовый метод измерения, который основан на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в испытуемом объекте, зависящих от T_n , электропроводности материалов покрытия и основания, а также геометрических характеристик изделия. Для использования таких толщиномеров на территории РФ необходимо обеспечить возможность их калибровки, а в областях, относящихся к сфере государственного регулирования, — проведение испытаний в целях утверждения типа и поверки. Кроме того, изготовителям толщиномеров необходимо решать задачу корректной градуировки толщиномеров при производстве.

Исходя из изложенного необходимо обеспечить прослеживаемость толщиномеров к государственным первичным эталонам через поверочную схему, включающую в себя в качестве вторичных эталонов меры толщины металлических покрытий с известными задаваемыми электрофизическими и

геометрическими параметрами. Такие меры необходимы для градуировки, первичной и периодических поверок, а также для калибровки вихретоковых толщиномеров при выполнении измерений в производственных условиях.

Рассмотрим параметры мер толщины металлических покрытий и структуру поверочной схемы для определения метрологических характеристик средств измерений толщины покрытия вихретоковым фазовым методом.

Данный метод имеет ряд преимуществ, главными из которых являются отстройка от влияния зазора h , шероховатости Rz и радиуса R основания в широких диапазонах при соответствующих настройках [1].

В вихретоковых толщиномерах металлических покрытий ведущих производителей применяются трансформаторные трехобмоточные скомпенсированные первичные измерительные преобразователи с дифференциальным включением измерительной и компенсационной обмоток, схема чувствительного элемента которых представлена на рис. 1.

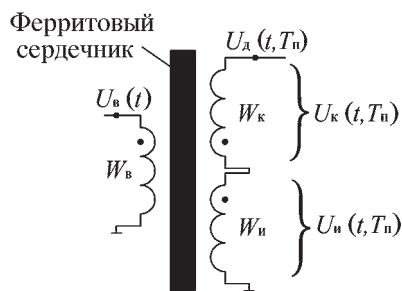


Рис. 1. Схема чувствительного элемента трансформаторного трехобмоточного скомпенсированного первичного измерительного преобразователя с дифференциальным включением измерительной и компенсационной обмоток: $U_b(t)$ – напряжение возбуждения; W_b – обмотка возбуждения; $U_d(t, T_n)$ – выходное напряжение; W_k – обмотка компенсационного элемента; $U_k(t, T_n)$ – напряжение на компенсационной обмотке; W_n – измерительная обмотка чувствительного элемента, $U_n(t, T_n)$ – напряжение на измерительной обмотке

Для представленного чувствительного элемента, сбалансированного при $h=\infty$, выходное напряжение $\dot{U}_d(h=\infty)=0$. Для рассматриваемого случая выходное напряжение равно

$$\dot{U}_d = \dot{U}_{вн}(T_n), \quad (1)$$

где $\dot{U}_{вн}$ – вносимое напряжение, фаза $\Delta\varphi$ которого изменяется относительно \dot{U}_b при изменении T_n и вариации основных мешающих параметров: удельной электропроводности σ_n покрытия, отно-

сительной магнитной проницаемости $\mu_{осн}$ и удельной электропроводности $\sigma_{осн}$ основания.

Диапазон измеряемых толщин зависит от частоты f тока возбуждения и σ_n . В общем случае максимальная измеряемая толщина покрытия $T_{n\max}$ может быть оценена с помощью уравнения [2]

$$T_{n\max} = 0,8\delta_0, \quad (2)$$

где δ_0 – стандартная глубина проникновения электромагнитной волны для материала покрытия.

Для неферромагнитных металлических покрытий

$$\delta_0 = \frac{503}{\sqrt{f\sigma_n}}. \quad (3)$$

На рис. 2 представлена зависимость $\dot{U}_{вн}$ от контролируемого T_n и мешающих $\mu_{осн}$, $\sigma_{осн}$, σ_n параметров.

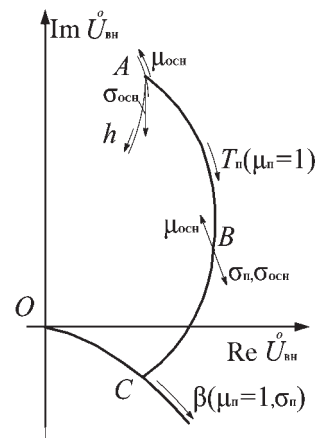


Рис. 2. Зависимость $\dot{U}_{вн}$ от контролируемых и мешающих параметров для задач измерения T_n неферромагнитных электропроводящих покрытий на ферромагнитном электропроводящем основании

В точке A , соответствующей установке преобразователя на электропроводящее ферромагнитное основание при $T_n=0$, на результаты измерений будет оказывать влияние девиация $\mu_{осн}$ и $\sigma_{осн}$, приводящие к изменению $\Delta\varphi$ по нелинейному закону.

При увеличении T_n вектор $\dot{U}_{вн}$ будет описывать годограф от точки A к точке C , что соответствует увеличению $\Delta\varphi$. Точка C соответствует случаю $T_n \gg \delta_0$, когда на $\Delta\varphi$ влияет исключительно σ_n . В промежуточных точках годографа, например B , в которых $T_n < \delta_0$, на $\Delta\varphi$ оказывают влияние $\mu_{осн}$, $\sigma_{осн}$ и σ_n , вносящие дополнительную погрешность при измерении T_n .

Для анализа характеристик преобразователя удобно использовать обобщенный параметр вихревого контроля

$$\beta = r \sqrt{2\pi f \sigma_{\text{очн}} \mu_0}, \quad (4)$$

где r – эквивалентный радиус обмотки возбуждения; μ_0 – магнитная постоянная.

В данном случае оптимальными являются значения $\beta = 3 \dots 10$. Для определения составляющих расширенной неопределенности измерения $T_{\text{п}}$, вносимых вариацией значений $\mu_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{п}}$ была разработана расчетная модель малогабаритного вихрекового трехобмоточного трансформаторного первичного измерительного преобразователя с ферритовым сердечником над двухслойной структурой (рис. 3), использующего в качестве первичного информативного параметра $\Delta\varphi$ вносимого напряжения $\dot{U}_{\text{вн}}$.

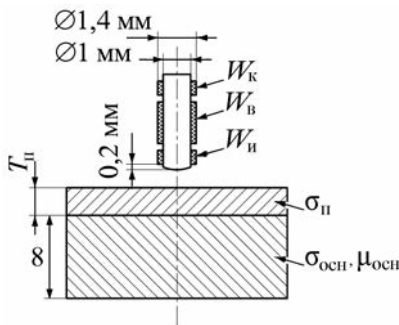


Рис. 3. Модель чувствительного элемента вихрекового трехобмоточного первичного измерительного трансформаторного преобразователя с ферритовым сердечником над двухслойной структурой

Модель является двумерной, осесимметричной, стационарной, в общем случае нелинейной, с открытыми границами первого рода, удовлетворяющими условиям Дирихле [3]. Путем вращения вокруг оси Z формировалась трехмерная модель, для которой задавались величины изменяемых параметров $\mu_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{п}}$, $T_{\text{п}}$, вычислялись $\text{Im}\dot{U}_{\text{вн}}$ и $\text{Re}\dot{U}_{\text{вн}}$, по которым рассчитывались зависимости $\Delta\varphi(T_{\text{п}}, \sigma_{\text{очн}}, \sigma_{\text{п}}, \mu_{\text{очн}})$ для частот возбуждения $f = 65, 200$ кГц и $1,8$ МГц. Значения f были выбраны исходя из анализа существующих преобразователей и задач измерения.

В ходе моделирования были рассчитаны зависимости $\Delta\varphi(T_{\text{п}}, \sigma_{\text{очн}}, \sigma_{\text{п}} = \text{const}, \mu_{\text{очн}} = \text{const})$ при вариации значений $\sigma_{\text{очн}}$ в пределах 10%. Анализ зависимостей показал, что вносимая погрешность $\Delta T(\sigma_{\text{очн}})$ для $\sigma_{\text{п}}$ в диапазоне от 7 до 60 МСм/м будет равна

$$\Delta T(\sigma_{\text{очн}}) = q \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{очн}}}{\sigma_{\text{очн}}} \right) T_{\text{п}} \quad [\sigma_{\text{п}} = \text{const}, \mu_{\text{очн}} = \text{const}], \quad (5)$$

где q изменяется в диапазоне от 1,49 до 1,62.

Аналогично были рассчитаны зависимости $\Delta\varphi(T_{\text{п}}, \sigma_{\text{очн}} = \text{const}, \mu_{\text{очн}} = \text{const}, \sigma_{\text{п}})$ при вариации $\sigma_{\text{п}}$ в пределах 10%. Их анализ показал, что $\Delta T(\sigma_{\text{п}})$ будет изменяться в соответствии с уравнением

$$\Delta T(\sigma_{\text{п}}) = s \left(\frac{\Delta\sigma_{\text{п}}}{\sigma_{\text{п}}} \right) T_{\text{п}} \quad [\sigma_{\text{очн}} = \text{const}, \mu_{\text{очн}} = \text{const}], \quad (6)$$

где s изменяется в диапазоне от 0,86 до 1,01 в зависимости от $\sigma_{\text{п}}$.

Также был проведен расчет зависимости $\Delta\varphi(T_{\text{п}}, \sigma_{\text{очн}} = \text{const}, \sigma_{\text{п}} = \text{const}, \mu_{\text{очн}})$ при вариации $\mu_{\text{очн}}$ в пределах 10%. Анализ полученных зависимостей показал, что изменение вносимой погрешности $\Delta T(\mu_{\text{очн}})$ для $\sigma_{\text{п}}$ в диапазоне от 7 до 60 МСм/м и $\sigma_{\text{очн}}$ при вариации в пределах 10% будет равно

$$\Delta T(\mu_{\text{очн}}) = p \left(\frac{\Delta\mu_{\text{очн}}}{\mu_{\text{очн}}} \right) T_{\text{п}} \quad [\sigma_{\text{п}} = \text{const}, \sigma_{\text{очн}} = \text{const}], \quad (7)$$

где p изменяется в диапазоне от 1,56 до 1,69.

Исходя из потребностей современных производств, технологических процессов и экономической эффективности, при проведении поверки вихрековых толщиномеров по мерам толщины металлических покрытий прямым методом будет достаточным обеспечить погрешность

$$\Delta T_{\text{п}} \leq \pm (0,02 T_{\text{п}} + 1) \text{ мкм}. \quad (8)$$

Как уже было сказано, основными влияющими на точность результата измерений параметрами являются $\mu_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{очн}}$, $\sigma_{\text{п}}$. При анализе примем, что величина составляющей погрешности, обусловленной вариацией мешающих параметров, должна быть не более половины согласно формуле (8). Также примем, что

$$|\Delta T(\mu_{\text{очн}})| = |\Delta T(\sigma_{\text{очн}})| = |\Delta T(\sigma_{\text{п}})| = \frac{1}{2} |\Delta T(\mu_{\text{очн}}, \sigma_{\text{очн}}, \sigma_{\text{п}})|. \quad (9)$$

Тогда допустимое отклонение толщины покрытия вследствие вариации каждого из мешающих параметров будет

$$|\Delta T(\mu_{\text{очн}})| = |\Delta T(\sigma_{\text{очн}})| = |\Delta T(\sigma_{\text{п}})| = 0,167 |\Delta T_{\text{п}}| \leq 0,167 (0,02 T_{\text{п}} + 1) = 0,0033 T_{\text{п}} + 0,167 \text{ мкм}. \quad (10)$$

На основании данного предположения, исходя из полученных коэффициентов q, s, p и формул (8) – (10), рассчитаны диапазоны вариации ме-

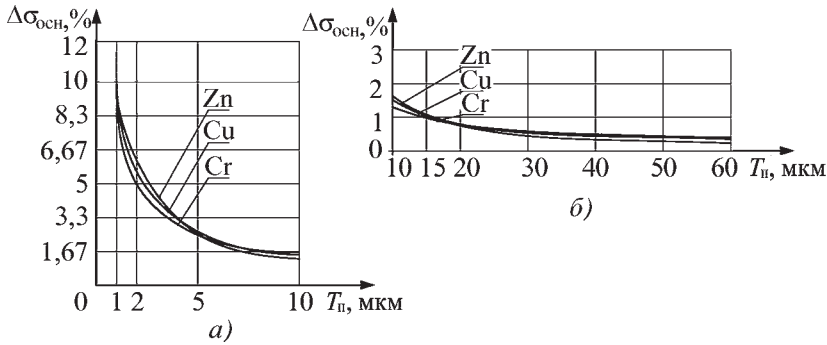


Рис. 4. Зависимость максимально допустимого отклонения значения мешающего параметра $\sigma_{очн}$ от толщины покрытия $T_{п}$:
а – в диапазоне от 0 до 10 мкм;
б – в диапазоне от 10 до 60 мкм

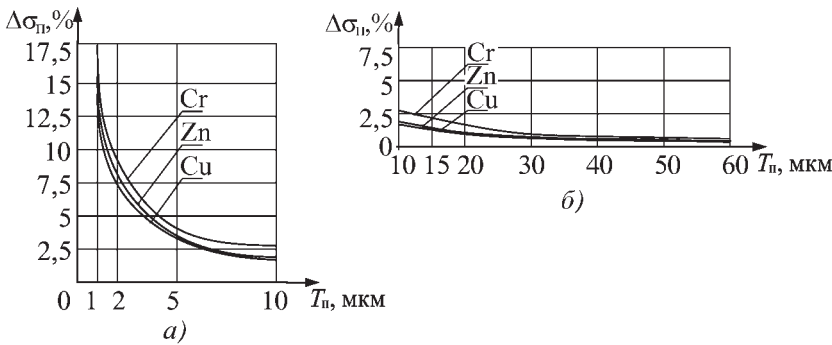


Рис. 5. Зависимость максимально допустимого отклонения значения мешающего параметра $\sigma_{п}$ от толщины покрытия $T_{п}$:
а – в диапазоне от 0 до 10 мкм;
б – в диапазоне от 10 до 60 мкм

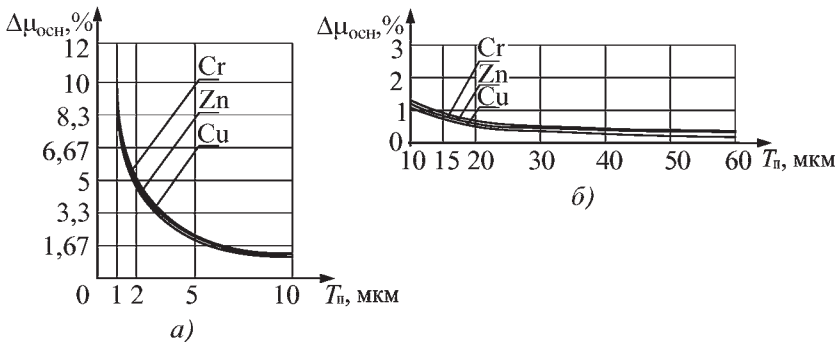


Рис. 6. Зависимость максимально допустимого отклонения значения мешающего параметра $\mu_{очн}$ от толщины покрытия $T_{п}$:
а – в диапазоне от 0 до 10 мкм;
б – в диапазоне от 10 до 60 мкм

шающих параметров, при которых будет выполняться условие (8), представленные на рис. 4–6.

На графиках условно выделено три диапазона толщин и определены максимально допустимые отклонения каждого из мешающих параметров $\mu_{очн}$, $\sigma_{очн}$ и $\sigma_{п}$, обеспечивающие выполнение условия (10).

Максимально допустимое относительное отклонение $\mu_{очн}$ в диапазоне $T_{п}$ от 0 до 10 мкм составляет 0,84 %, от 10 до 30 мкм – 0,34 %, от 30 до 60 мкм – 0,23 %, максимально допустимое относительное отклонение $\sigma_{очн}$ в диапазоне $T_{п}$ от 0 до 10 мкм составляет 0,87 %, от 10 до 30 мкм – 0,56 %, от 30 до 60 мкм – 0,24 %. Максимально допустимое относительное отклонение $\sigma_{п}$ в диапазоне $T_{п}$ от 0 до 10 мкм составляет 1,70 %, от 10 до 30 мкм – 0,74 %, от 30 до 60 мкм – 0,64 %.

Таким образом, получены критерии отбора мер толщины по основным мешающим параметрам для градуировки и поверки вихрековых толщиномеров.

На рис. 7 представлен проект схемы обеспечения прослеживаемости для средств измерений толщины металлических покрытий, реализующих вихрековый фазовый метод.

Структура поверочной схемы включает в себя четыре уровня метрологической цепи для определения и распространения единицы толщины покрытия и предполагает проверку $\mu_{очн}$, $\sigma_{очн}$ и $\sigma_{п}$ с учетом изложенных требований.

На сегодняшний день в Государственный реестр средств измерений внесены три типа мер толщины металлических покрытий [4]. Их основными метрологическими характеристиками по описанию типа являются: номинальное значение ме-

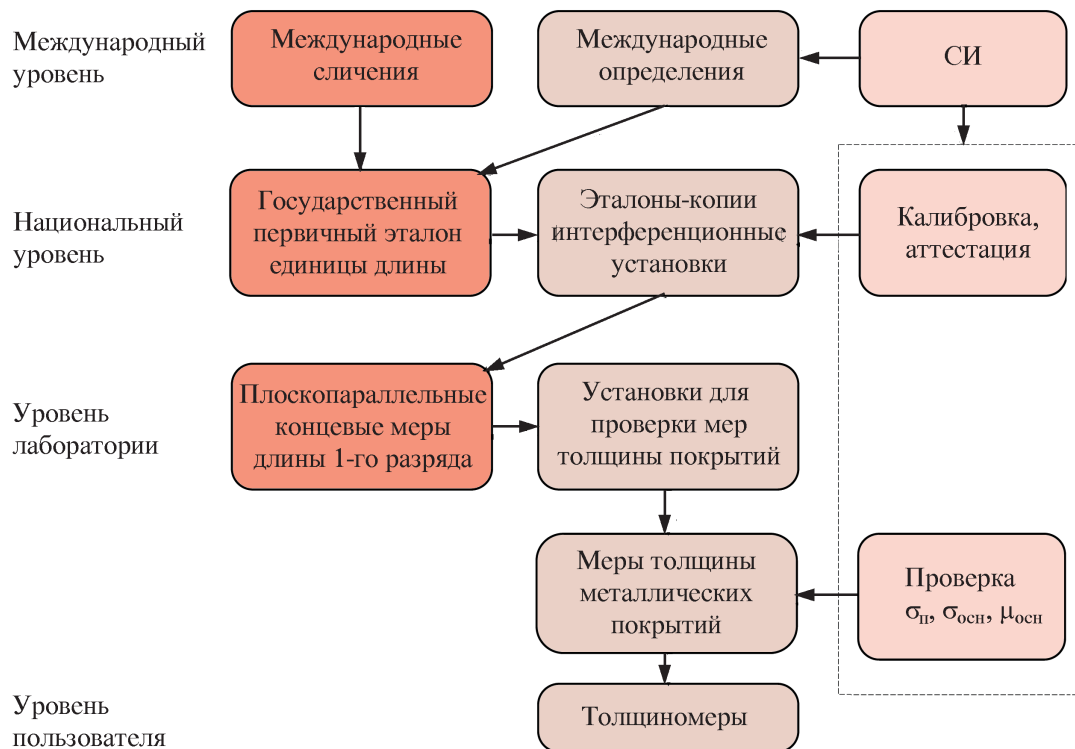


Рис. 7. Проект схемы обеспечения прослеживаемости для средств измерений толщины металлических покрытий

ры толщины металлических покрытий, допустимое отклонение толщины от номинального значения, пределы допускаемой основной абсолютной погрешности или предел допускаемого среднеквадратичного отклонения результатов измерений толщины покрытия. Из описания следует, что при поверке мер толщины металлических покрытий должны проверяться только геометрические параметры — толщина покрытия, разнотолщинность и R_z основания и покрытия без учета электрофизических и других свойств мер толщины металлических покрытий. При этом определяется только действительное значение толщины — среднее арифметическое результатов измерений, отклонение от номинального значения, среднеквадратическое отклонение.

Для обеспечения единства измерений в области толщино-

метрии покрытий, координации работ метрологических служб, производителей и потребителей вихретоковых фазовых толщиномеров металлических покрытий представляется необходимым разработка стандарта «Немагнитные металлические покрытия на магнитных металлических и немагнитных основаниях. Измерение толщины покрытий вихретоковым фазовым методом» в трех частях:

- часть 1 «Метод измерения»,
 - часть 2 «Поверка вихретоковых фазовых толщиномеров»,
 - часть 3 «Калибровка и поверка мер толщины металлических покрытий»,
- а также поверочной схемы с учетом изложенного выше.

Библиографический список

1. Сясько В.А. Теория и методы создания электромагнитных

приборов контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Константа, 2015. 372 с.

2. ISO 21968:2005. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials. Measurement of coating thickness. Phase-sensitive eddy-current method. BSI, 2005. 22 p.

3. Потапов А.И., Сясько В.А., Соколенчук П.В. и др. Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 1. Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Нестор-История, 2014. 480 с.

4. Росстандарт. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений. URL: <http://www.fundmetrology.ru/default.aspx>