

УДК 531.717:539.238

Р.А. Лаанеотс, Ю.Р. Риим

Таллиннский технический университет, Таллинн, Эстония

## МЕТОД КАЛИБРОВКИ ЭТАЛОНОВ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ

Описывается разработанный новый метод калибровки эталонов толщины покрытия. Метод заключается в осязании верхней поверхности эталона и, по результатам осязания, в расчете уравнения предсказываемого профиля поверхности основания, покрытой покрытием по двум уравнениям профиля поверхности основания, полученным на основе результатов осязания непокрытой поверхности основания. Толщина покрытия определяется как расстояние между профилем верхней поверхности покрытия и предсказываемым профилем основания покрытого покрытием.

**Ключевые слова:** толщина покрытия, эталон толщины покрытия, калибровка, результат калибровки, неопределенность.

### Введение

Эталоном толщины покрытия (ЭТП) является средство измерений толщины покрытия, предназначенное для хранения и воспроизведения толщины покрытия заданного значения. ЭТП предназначены для калибровки толщиномеров покрытий. От их конфигурации и инструментальной неопределенности зависит во многом суммарная неопределенность результата калибровки толщиномеров покрытий.

ЭТП представляет собой сочетание покрытия и основания, изготовленных из материалов для измерения толщины которых предназначен конкретный толщиномер покрытий. При этом те ЭТП, которые обеспечивают воспроизведение требуемого значения толщины покрытия для определенных групп материалов оснований и покрытий, являются эквивалентными. По назначению ЭТП в свою очередь подразделяются на рабочие и опорные эталоны.

По конструкции ЭТП представляет собой квадратные пластины 1 из определенного материала, посередине которых нанесено покрытие 2 (рис. 1).

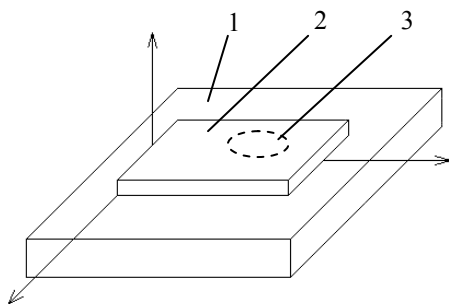


Рис. 1. Эталон толщины покрытия (ЭТП)

1 – основание, 2 – покрытие, 3 – рабочая площадь

Основными техническими требованиями при изготовлении ЭТП являются: соблюдение плоскостности верхней поверхности основания 1 (допуск плоскостности не более 0,3 максимальной допускаемой погрешности измерения калибруемого толщино-

мера покрытий) и высокой чистоты верхней поверхности основания 1 и покрытия 2 (значение параметра шероховатости  $R_z$  в пределах от 0,025  $\mu\text{m}$  до 3,2  $\mu\text{m}$  в зависимости от номинального значения толщины покрытия ЭТП). Кроме вышеуказанных основных требований на поверхностях эталонов не допускают трещин, забоин, посторонних включений, следов коррозии, а на покрытии кроме вышеуказанного, отслаиваний, вздутий, питингов, набросов и других дефектов, ухудшающих внешний вид и влияющих на эксплуатационные показатели ЭТП [1].

С целью воспроизведения ряда одноименных толщин покрытий различных значений ЭТП собираются в специальные комплекты, называемые набором ступенчатых ЭТП.

Толщиномеры покрытий калибруются по рабочим ЭТП. При этом калибровкой является операция, с помощью которой при заданных условиях на первом этапе устанавливают соотношение между значениями величины с неопределенностями измерений, которые обеспечивают эталоны, и соответствующими показаниями вместе со связанными с ними неопределенностями, а на втором этапе используют эту информацию, чтобы установить соотношение, позволяющее получить результат измерения исходя из показания [2]. Используя это определение в области измерения толщин покрытий с соблюдением обеспечения метрологической прослеживаемости результата измерения толщины покрытия, полученным с помощью калибруемого толщиномера, рабочие ЭТП в свою очередь должны быть калиброваны через документированную непрерывную цепь калибровок от исходной основы для сравнения [3]. При измерении толщин покрытий исходной основой для сравнения является единица измерения толщины покрытия  $\mu\text{m}$  [1, 4].

Калибровка ЭТП в общем состоит в измерении толщины покрытия с помощью соответственного эталонного средства измерений длины и в выдаче

калибровочного удостоверения с указанием полученных данных [1, 4].

Известный метод калибровки ЭТП заключается в следующем. Перед нанесением покрытия на середину верхней поверхности основания измеряется (осязается, профилируется) плоскостность контактным или бесконтактным методом верхней поверхности основания в определенных сечениях с помощью эталонного средства измерений и получают графические изображения профилей этой поверхности. Далее на середину этой поверхности наносится покрытие в виде ступеньки. Измеряется (осязается) снова верхняя поверхность непокрытого и покрытого основания в определенных сечениях с помощью эталонного средства измерений и получают графические изображения ступенчатых профилей этой поверхности. На основании высоты ступеньки профилей и, учитывая уравнения полученных профилей перед нанесением покрытия, оценивается при этом результат калибровки ЭТП и расширенная неопределенность этого результата [1, 4 – 6].

**Цель статьи** – развитие и совершенствование метода калибровки ЭТП с учетом прогнозирования профилей поверхности основания покрытым покрытием.

### Основной материал

Все ЭТП имеют рабочую площадь 3, т.е. участок поверхности ЭТП, на котором нормируется значение толщины покрытия (рис. 1). Это значение толщины покрытия, установленным на рабочей площади ЭТП после его калибровки, является калибровочным значением ЭТП и приписывается к нему.

Как показали исследования в [1, 6], реальная верхняя поверхность основания имеет выпуклую или вогнутую форму. Поэтому при использовании известного метода калибровки ЭТП результат калибровки во многом зависит от отклонения плоскостности верхней поверхности основания, так как толщина покрытия определяется как расстояние от стороны стоящей поверхности основания, а не от поверхности, находящейся над поверхностью покрытия. Вследствие этого, суммарная неопределенность результата калибровки толщины покрытия во многом зависит от допуска на плоскостность верхней поверхности основания, соблюдаемым при технологической обработке этой поверхности. В работе, с целью уменьшения значения расширенной неопределенности результата калибровки толщины покрытия, рассматриваются вопросы оценки уравнения поверхности, находящейся над поверхностью покрытия, по полученным результатам осязания сторон стоящих поверхностей основания.

Связываем ЭТП с прямоугольной системой координат OXYZ так, чтобы плоскость OXY системы координат совпала бы со средней плоскостью верхней поверхности основания так, как это показано на рис. 1. В этом случае предельные контуры граничных поверхностей ЭТП, определяемые случайными функциями, принимают, например, в сечении I–I

вид, указанный на рис. 2. Если смотреть этот эталон в произвольном сечении (в данном случае в одном из шести сечений), параллельной плоскости OYZ, то полученный вид будет аналогичным виду, указанному на рис. 2.

Проблема в этом случае состоит в том, что реализация случайных функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$  с помощью осязания (измерения) верхней поверхности основания при калибровке ЭТП (профили 1 и 2) возможно только в пределах от  $y_1$  до  $y_2$  и от  $y_5$  до  $y_6$  (рис. 2). Определение (реализация) случайной функции граничной поверхности между основанием и покрытием  $\tilde{Z}(y)$  (профиль 4) является невозможным из-за того, что покрытие связано с основанием.

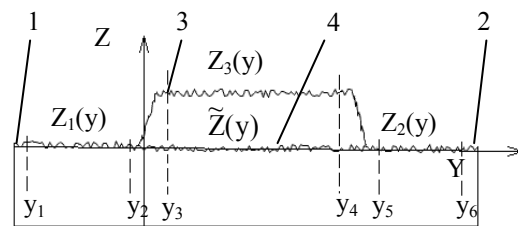


Рис. 2. Изображения профилей верхней поверхности основания и покрытия в определенном сечении ЭТП (в сечении I–I), параллельной плоскости OYZ:

1, 2 – профили основания, 3 – профиль покрытия, 4 – прогнозируемый профиль основания под покрытием

Оценка прогнозируемой случайной функции  $\tilde{Z}(y)$  граничной поверхности между основанием и покрытием (профиль 4) в настоящем случае возможна только на основе случайных функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$ , определяемых с помощью результатов измерений (осязаний) верхней поверхности основания на участках от  $y_1$  до  $y_2$  и от  $y_5$  до  $y_6$ .

При определенных реализациях случайных функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$  предсказываемая случайная функция  $\tilde{Z}(y)$  может быть определена по уравнению

$$\tilde{Z}(y) = \frac{y_4 - y_3}{y_4 - y_3} \cdot Z_1 \left( \frac{y_2 - y_1}{y_4 - y_3} (y - y_3) + y_1 \right) + \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} \cdot Z_2 \left( \frac{y_6 - y_5}{y_4 - y_3} (y - y_3) + y_5 \right), \quad (1)$$

которое получено при смещении функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$  до участка от  $y_3$  до  $y_4$ . Это значит, что до места с координатой  $y_3$  доминирует функция  $Z_1(y)$ , а от места с координатой  $y_4$  доминирует функция  $Z_2(y)$ .

Предполагаем, что реализации случайных функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$  можно представить в форме:

$$Z_1(y) = \tilde{Z}_1 + a_1 y + b_1; \quad Z_2(y) = \tilde{Z}_2 + a_2 y + b_2, \quad (2)$$

где  $\tilde{Z}_1$  и  $\tilde{Z}_2$  – соответственно случайные величины с нормальным распределением  $N(0, \sigma_1)$  и  $N(0, \sigma_2)$ .

В этом случае центральные линейные функции  $m_{Z1}(y)$  и  $m_{Z2}(y)$ , рассчитанные из реализаций случайных функций  $Z_1(y)$  и  $Z_2(y)$ , имеют вид:

$$\begin{aligned} m_{Z1}(y) &= a_1y + b_1, \quad y_1 \leq y \leq y_2; \\ m_{Z2}(y) &= a_2y + b_2, \quad y_5 \leq y \leq y_6. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя эти центральные линейные функции и условия непрерывности, центральная функция  $m_{\tilde{z}}(y)$  предсказываемой случайной функции граничной поверхности между основанием и покрытием в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  принимает вид

$$\begin{aligned} m_{\tilde{z}}(y) &= \frac{y_4 - y}{y_4 - y_3} \cdot \left\{ a_1 \left( \frac{y_2 - y_1}{y_4 - y_3} (y - y_3) + y_1 \right) + b_1 \right\} + \\ &+ \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} \cdot \left\{ a_2 \left( \frac{y_6 - y_5}{y_4 - y_3} (y - y_3) + y_5 \right) + b_2 \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Дисперсия  $D_{\tilde{z}}(y)$  этой центральной функции  $m_{\tilde{z}}(y)$  определяется по уравнению

$$\begin{aligned} D_{\tilde{z}}(y) &= \left( \frac{y_4 - y}{y_4 - y_3} \right)^2 \sigma_1^2 + \left( \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} \right)^2 \sigma_2^2 + \\ &+ 2 \frac{y_4 - y}{y_4 - y_3} \cdot \frac{y - y_3}{y_4 - y_3} \text{cov}(\tilde{Z}_1, \tilde{Z}_2). \end{aligned} \quad (5)$$

В данном случае толщина покрытия ЭТП  $h(y)_{I-I}$  в сечении I-I в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  в зависимости от координаты  $y$  может быть определена по уравнению

$$h(y)_{I-I} = Z_3(y) - \tilde{Z}(y), \quad (6)$$

где  $Z_3(y)$  – случайная функция верхней поверхности покрытия в этом же сечении в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  может иметь вид

$$Z_3(y) = \tilde{Z}_3 + a_3y^2 + b_3y + c_3 \quad (7)$$

или вид

$$Z_3(y) = \tilde{Z}_3 + a_3y + b_3. \quad (8)$$

В данном случае центральная функция  $m_{Z3}(y)$ , рассчитанная из реализации случайной функции  $Z_3(y)$ , имеет в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  вид

$$m_{Z3}(y) = a_3y^2 + b_3y + c_3$$

или вид

$$m_{Z3}(y) = a_3y + b_3. \quad (9)$$

Среднее значение  $m_h(y)$  толщины покрытия ЭТП в этом сечении в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  в зависимости от координаты  $y$  на основе вышеизложенного определяется по уравнению

$$m_h(y) = m_{Z3}(y) - m_{\tilde{z}}(y) = a_3y^2 + b_3y + c_3 - m_{\tilde{z}}(y) \quad (10)$$

или по уравнению

$$m_h(y) = m_{Z3}(y) - m_{\tilde{z}}(y) = a_3y + b_3 - m_{\tilde{z}}(y). \quad (11)$$

Дисперсия  $D_h(y)$  среднего значения  $m_h(y)$  толщины покрытия ЭТП определяется в этом случае по уравнению

$$D_h(y) = D_{Z3}(y) + D_{\tilde{z}}(y), \quad (12)$$

где  $D_{Z3}(y)$  – дисперсия центральной функции  $m_{Z3}(y)$  верхней поверхности покрытия в этом же сечении в пределах от  $y_3$  до  $y_4$ .

С учетом только вышеуказанных дисперсий суммарная стандартная неопределенность  $u_h(y)$  среднего значения  $m_h(y)$  в зависимости от координаты  $y$  в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  может быть определена по уравнению

наты  $y$  в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  может быть определена по уравнению

$$u_h(y) = \sqrt{D_{Z3}(y) + D_{\tilde{z}}(y)}. \quad (13)$$

Результаты калибровки, т.е. полученные реальные профили при осязании ЭТП No 1055 в сечении I-I в виде профилограмм, приведены на рис. 3 – 6.

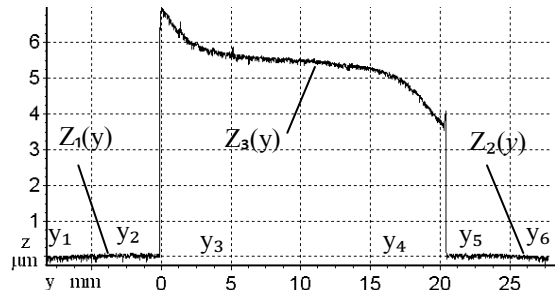


Рис. 3. Профилограмма, снятая в сечении I-I, параллельным плоскости OYZ

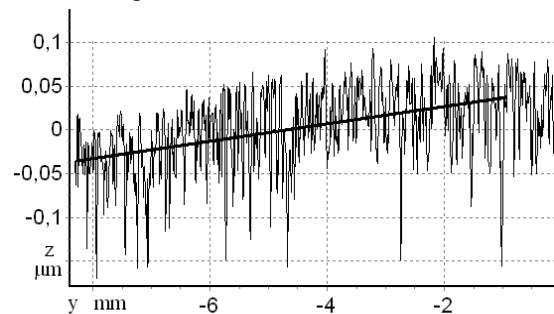


Рис. 4. Профилограмма, описывающая случайную функцию  $Z_1(y)$  верхней поверхности основания в пределах от  $y_1$  до  $y_2$  (увеличение)

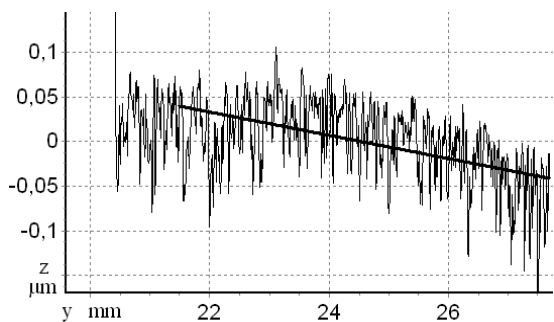


Рис. 5. Профилограмма, описывающая случайную функцию  $Z_2(y)$  верхней поверхности основания в пределах от  $y_5$  до  $y_6$  (увеличение)

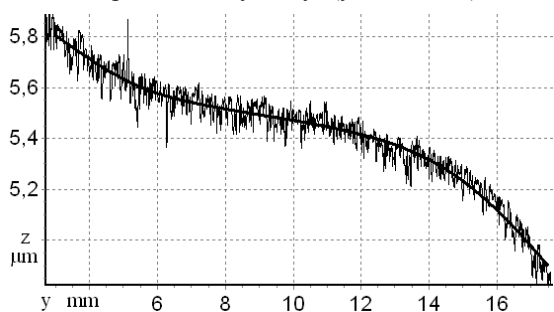


Рис. 6. Профилограмма, описывающая случайную функцию  $Z_3(y)$  верхней поверхности покрытия в пределах от  $y_3$  до  $y_4$  (увеличение)

По вышеизложенным результатам измерений при калибровке этого ЭТП можно составить следующее схематическое изображение для определения средней толщины покрытия  $h_{m,I-I}$  ЭТП в данном сечении (рис. 7).

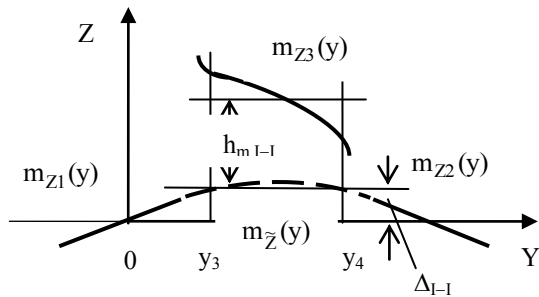


Рис. 7. Схема для определения средней толщины покрытия в сечении I-I

Калибровка ЭТП обычно производится с определенным шагом в трех сечениях, параллельных плоскости OYZ, и трех перпендикулярных сечениях, параллельных плоскости OXZ [1]. В результате получается шесть профилограмм, аналогичных вышеизложенному.

На основе шести профилограмм рассчитывается средняя толщина покрытия  $h_m$  для рабочей площади ЭТП, т.е. для площади с размерами  $x_3 \times x_4 \times y_3 \times y_4$ . Суммарная стандартная неопределенность  $u_{hm}$  в данном случае содержит также компоненты, связанные с объектом измерения, т.е. с калибруемым ЭТП, и определяется по уравнению

$$u_{hm} = \sqrt{[u_h(y)]^2 + [u_o(y)]^2 + [u_n(y)]^2}, \quad (14)$$

где  $u_o(y)$  – стандартная неопределенность, зависящая от формы основания ( $u_o(y) = [(m_{z_2}(y)_{\max} - m_{z_2}(y)_{\min})/2]/\sqrt{3}$ );  $u_n(y)$  – стандартная неопределенность, зависящая от формы покрытия

$$(u_n(y) = [(m_{z_3}(y)_{\max} - m_{z_3}(y)_{\min})/2]/\sqrt{3}).$$

Расширенная неопределенность  $U_{hm}$  среднего значения  $h_m$  толщины покрытия ЭТП определяется по уравнению

$$U_{hm} = k \cdot u_{hm}, \quad (15)$$

где  $k$  – коэффициент охвата, значение которого зависит от вида распределения расчетного среднего значения толщины покрытия ЭТП и от выбранной вероятности охвата (нами принято  $k = 2$  и  $P = 95\%$ ).

Калибровка ЭТП No 1055 никель на стали по предложенному методу (измерения проводились в шести сечениях) дала следующий результат

$$h_m = 5,2 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}.$$

В калибровочном удостоверении предыдущей калибровки [7] этого эталона был дан результат

$$h_{m,\text{пред}} = 5,40 \mu\text{m} \pm 0,15 \mu\text{m}.$$

## Выводы

Как видно из представленных результатов калибровки, предложенный новый метод калибровки позволяет повышать точность и правильность калибровки ЭТП из-за учета систематического эффекта  $\Delta$  и связанной с ним неопределенности, которых известный метод калибровки не может учитывать.

*This work is carried out the support of Estonian Ministry of Education Science Grant No 0140113Bs08 and Estonian Science Grant No 7475.*

## Список литературы

1. Лаанеотс Р.А. Методы и средства для поверки толщиномеров покрытий / Р.А. Лаанеотс. – Таллинн: Валгус, 1989. – 160 с.
2. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). – Paris: BIPM – Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. – 82 p.
3. Laaneots R. An Introduction to Metrology / R. Laaneots, O. Mathiesen. – Tallinn: TUT Press, 2006. – 271 p.
4. Hoffmann K.-P. Rückführung von Schichtdickenmessungen / K.-P. Hoffmann, T. Ahbe, P. Thomson-Schmidt // Galvanotechnik. – 2006. – No 11. – S. 2654-2660.
5. Hoffmann K.-P. Schichtdickenbestimmung durch profilometrischen Messen in Verbindung mit örtlich begrenzter Schichtablösung / K.-P. Hoffmann // Galvanotechnik. – 2000. – No 1. – S. 82-87.
6. Abiline I. Calibration Methods of Coating Thickness Gauges. Thesis on mechanical and instrumental engineering / I. Abiline. – Tallinn: TUT Press, 2008. – 76 p.
7. Riim J. Evaluation method of coating thickness of coating thickness standard. Proceedings 14th International Congress of METROLOGIE / J. Riim, R. Laaneots – Paris: Collège Français de Metrologie, 2009. – 6 p.

Поступила в редколлегию 23.02.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.П. Захаров, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

## МЕТОД КАЛІБРОВКИ ЕТАЛОНІВ ТОВЩИНИ ПОКРИТТЯ

Р.А. Лаанеотс, Ю.Р. Риим

Описується розроблений новий метод калібрівки еталонів товщини покриття. Метод полягає в дотику верхньої поверхні еталона й за результатами дотику в розрахунках рівняння профілю, що передвіщається, поверхні основи, покритої покриттям по двох рівняннях профілю поверхні основи, отриманим на основі результатів дотику непокритої поверхні основи. Товщина покриття визначається як відстань між профілем верхньої поверхні покриття профілем, що передвіщається, основи покритого покриттям.

**Ключові слова:** товщина покриття, еталон товщини покриття, калібрівка, результат калібрівки, невизначеність.

## CALIBRATION METHOD OF COATING THICKNESS STANDARDS

R.A. Laaneots, J.R. Riim

*The paper describes a new method regarding calibrating the coating thickness standards, which is based on the groping of the surface of thickness standards. The cropping results enable to calculate the functions of the surfaces that are not covered and thereafter calculate the assumed profile and the functions of surface under the coating. Coating thickness is determined as a distance between the profile of a surface of the coating and the assumed profile under the coating.*

**Keywords:** coating thickness, coating thickness standard, calibration, calibration result, uncertainty of measurement.