

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-7-39-44>

ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ ШАРОВОГО ИСТИРАНИЯ

© Кирилл Валерьевич Гоголинский^{1*}, Антон Евгеньевич Ивкин^{1,2}, Варвара Владимировна Алехнович¹, Алексей Юрьевич Васильев^{2,3}, Анастасия Евгеньевна Тюрнина⁴, Александр Сергеевич Васильев⁴

¹ Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. С.-Петербург, Васильевский остров, 21-я линия, д. 2; e-mail: varya199.7@mail.ru

² ООО «КОНСТАНТА», Россия, 198095, г. С.-Петербург, а/я 42.

³ ВНИИМ имени Д. И. Менделеева, Россия, 190005, С.-Петербург, Московский пр. 19.

⁴ УНИИМ — филиал ВНИИМ имени Д. И. Менделеева, Россия, 620000, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская 4.

Статья поступила 25 марта 2020 г. Поступила после доработки 20 апреля 2020 г. Принята к публикации 28 апреля 2020 г.

Толщина — один из ключевых параметров, характеризующих качество и функциональные свойства покрытий. Для ее измерения чаще всего на практике используют различные косвенные методы (электромагнитные, радиационные, оптические), основанные на функциональной зависимости того или иного физического параметра системы от толщины последнего. Основное ограничение точности при этом — чувствительность способов определения к свойствам покрытий. Поэтому актуально развитие и внедрение подходов, включающих непосредственное измерение геометрических параметров покрытий. Однако они зачастую относятся к разрушающим методам, требующим специального оборудования, и должны проходить метрологическую аттестацию (ГОСТ Р 8.563–2009). В статье предложен способ определения толщины покрытий методом абразивного шарового истирания. Приведены технические режимы необходимого испытательного оборудования, алгоритм проведения измерений и расчетные формулы. Представлены результаты оценки показателей точности предлагаемой методики расчетным и экспериментальными способами (в обоих случаях относительная погрешность не превышала 6 %). Показано, что методика применима для широкого спектра материалов покрытий (от мягких металлов до сверхтвердых керамик) толщиной от единиц до сотен микрометров и может быть рекомендована не только для технологического и выходного контроля, но и в качестве референтного подхода для метрологической аттестации мер и настроечных образцов для различных типов толщиномеров.

Ключевые слова: метрология; толщина покрытия; метод шарового истирания; методика измерений; референтная методика; показатели точности.

EVALUATION OF THE ACCURACY INDICATORS IN DETERMINATION OF THE COATING THICKNESS BY CRATER GRINDING METHOD

© Kirill V. Gogolinsky^{1*}, Anton E. Ivkin^{1,2}, Varvara V. Alekhnovich¹, Aleksey Yu. Vasiliev^{2,3}, Anastasia E. Tyurnina⁴, Alexander S. Vasiliev⁴

¹ St. Petersburg Mining University, 2, 21 liniya Vasilyevskogo ostrova, St. Petersburg, 199106, Russia; *e-mail: varya199.7@mail.ru

² Constanta LLC, P. O. box 42, St. Petersburg, 198095, Russia.

³ D. I. Mendeleyev Metrology Institute, 19, Moskovsky pr., St. Petersburg, 190005, Russia.

⁴ UNIIM — D. I. Mendeleyev Metrology Institute Branch, 4, ul. Krasnoarmeyskaya, Yekaterinburg, 620000, Russia.

Received March 25, 2020. Revised April 20, 2020. Accepted April 28, 2020.

Thickness is one of the key indicators characterizing the quality and functional properties of coatings. Various indirect methods (electromagnetic, radiation, optical) most often used in practice to measure thickness are based on the functional dependence of a particular physical parameter of the system “base – coating” on the coating thickness. The sensitivity of these procedures to the certain properties of coatings imposes the main restriction to the accuracy of measurements. Therefore, the development and implementation of the approaches based on direct measurements of geometric parameters of the coating appears expedient. These methods often belong to the class of “destructive” and, in addition to measuring instruments, require the use of special equipment. To ensure the uniformity of measurements in the laboratory or technological control, these methods are isolated as a separate procedure (method) and must undergo metrological certification in accordance with GOST R 8.563–2009. We present implementation, metro-

logical certification and practical application of the method for measuring thickness of coatings by crater-grinding method. The principles of technical implementation of test equipment, measurement procedure and calculation formulas are described. The results of evaluating the accuracy indicators of the proposed procedure by calculation and experimental methods are presented. In both cases, the relative error did not exceed 6%. The applicability of the developed technique is shown for a wide range of coating materials (from soft metals to superhard ceramics) of different thickness (with from units to hundreds of micrometers). Apart from the goals of process control and outgoing inspection, the method can be recommended as a reference measurement procedure for calibration of measures and adjusting samples for various types of thickness gauges.

Keywords: metrology; coating thickness; crater-grinding method; measurement procedure; reference measurement procedure; measurement accuracy.

Введение

Контроль качества покрытия включает определение ряда параметров (длины, толщины, высоты, шероховатости и др.), характеризующих его функциональные свойства [1, 2]. По сравнению с другими параметрами такой показатель, как толщина, характеризуется известными трудностями как при нормировании, так и при измерении [3].

Для определения толщины покрытия применяют различные средства и методы [4]. Некоторые из них стандартизованы на международном уровне (ISO 26423:2009, ISO 18452:2005). В частности, толщину тонких покрытий контролируют методами наноиндентирования и сканирующей зондовой микроскопии, металлических покрытий — вихретоковыми толщиномерами, реализующими амплитудный, фазовый и амплитудно-фазовый методы измерений, основанные на анализе электромагнитного поля вихревых токов, наводимых в объекте контроля. Градуировку, поверку и калибровку таких приборов проводят, как правило, с помощью мер — образцов покрытий, нормированных не только по толщине, но и по другим параметрам [5 – 9]. Однако не всегда имеется возможность изготовить и аттестовать меры или натурные образцы тех или иных типов покрытий. Кроме того, в соответствии с действующими нормативами меры толщины должны испытываться с использованием эталонных средств измерений или с применением референтных методик.

Для измерения толщины гальванических, высокотемпературных защитных покрытий, полученных способами ионно-лучевого (IBAD) и плазменного химического осаждения (PACVD), а также низкофрикционных и защитных алмазоподобных углеродных покрытий широко используют калотест — метод шарового истирания [10 – 12]. Метод активно применяют при исследовании трибологических свойств и износостойкости различных покрытий и поверхностно-модифицированных слоев [13, 14].

Цель работы — оценка параметров точности (погрешности, повторяемости и воспроизводи-

мости) метода шарового истирания при определении толщины покрытия.

Методика и оборудование

Толщину покрытий методом шарового истирания определяли в соответствии с ISO 26423:2009. Схема испытаний приведена на рисунке.

Шар, смоченный абразивной суспензией, в результате вращения формировал на поверхности испытуемого образца сферообразную выемку износа — кратер (или калотту). Испытание завершали, когда глубина кратера превышала толщину покрытия. Толщину определяли по следам износа (внешнему D и внутреннему d диаметрам выемки) и диаметру шара.

Толщину покрытия h для образцов, удовлетворяющих условию плоскостности $r_s > 100r_b$ (r_b , r_s — радиусы шара и кривизны образца), рассчитывали из соотношения

$$h = \sqrt{r_{bm}^2 - \frac{d^2}{4}} - \sqrt{r_{bm}^2 - \frac{D^2}{4}}, \quad (1)$$

где r_{bm} — среднее значение радиуса шара; d , D — значения единичных измерений внутреннего и внешнего диаметров сферообразного кратера.

Для образцов, не удовлетворяющих условию плоскостности, уравнение (1) меняется следующим образом:

$$h = \frac{D^2 - d^2}{8} \left(\frac{1}{r_{bm}} + \frac{1}{r_s} \right). \quad (2)$$

Аттестацию (оценку точности) методики проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.563–2009. Использовали следующее оборудование: устройство абразивного шарового истирания «Константа Ш2», цифровой оптический микроскоп «Альтами МВ0670Д» с камерой UCMOS05100KPA, шары класса G 200 (ГОСТ 3722–2014) диаметром D_b 10 и 30 мм. Для калибровки цифрового микро-

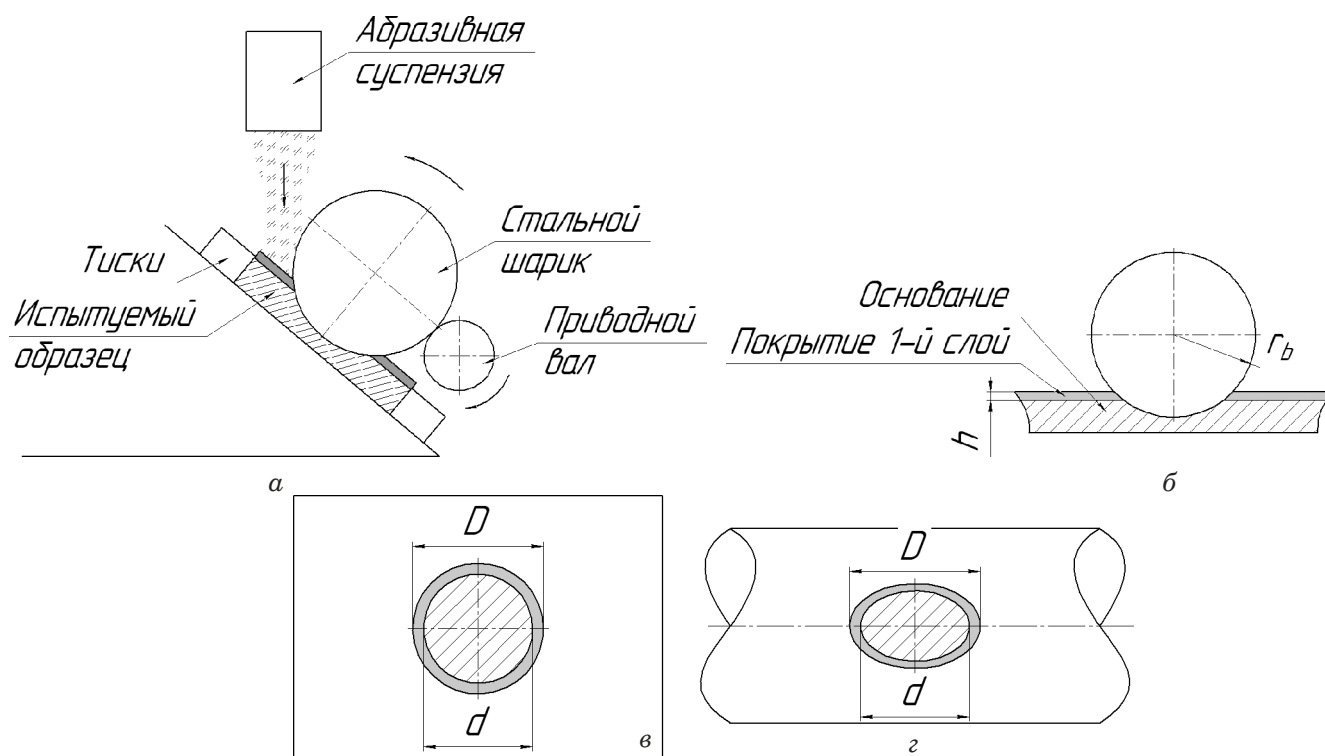


Схема испытания: *a* — общая; *b* — в разрезе; *в, г* — выемки на плоской (или сферической) и цилиндрической поверхностях соответственно (вид сверху)

Scheme of crater grinding procedure: *a* — general; *b* — sectional view of the abrasion process; *c, d* — craters on a flat (or spherical) and cylindrical surfaces (top view)

скопа использовали объект-микрометр ОМО (№ 590-63 в ФГИС «Аршин»). Диаметр шаров контролировали с помощью микрометров Micro-mar 40 EWR (№ 53762-13 в ФГИС «Аршин»). Цифровые изображения обрабатывали с использованием программы Altami Studio.

До начала испытания с помощью микрометра определяли среднее значение диаметра шара (по 10 измерениям). Отклонение разовых измерений от среднего не превышало 5 мкм. Испытание проводили до появления визуального контраста между основанием и покрытием. Размеры выемки находили по цифровому изображению (осуществляли не менее 10 измерений с последующим усреднением). В случае если исследуемый образец не удовлетворял условию плоскостности, радиус кривизны поверхности r_s измеряли или брали из соответствующей документации. По полученным данным толщину покрытия для плоских и цилиндрических образцов рассчитывали по формуле (1), для сферических — по (2). За окончательный результат принимали среднее арифметическое десяти параллельных испытаний (единичных анализов), полученных в условиях повторяемости (ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002).

Обсуждение результатов

Показатели точности оценивали расчетным и экспериментальным способами.

Расчетный метод включал анализ влияния погрешности средств измерений и случайного разброса измеряемых величин на результаты определения толщины покрытия (ГОСТ Р 8.736–2011).

Учитывали следующие источники неисключенной систематической погрешности (НСП): погрешность измерений диаметров ΔD и Δd , связанная с погрешностью оптического микроскопа ΔM ; погрешности измерений радиусов шара Δr_b и образца Δr_s (для сферических образцов). Случайную погрешность (СП) определял разброс значений ΔD_m и Δd_m , связанный с влиянием шероховатости поверхностей покрытия и основания, а также других случайных факторов.

Суммарная погрешность оптического микроскопа ΔM , определяемая разрешающей способностью оптической системы, количеством пикселей цифровой камеры, погрешностью объект-микрометра и случайным разбросом показаний при многократных измерениях длины, составила 10 мкм.

Для оценки составляющих НСП толщины покрытия Δh для образцов, удовлетворяющих условию плоскостности, рассчитывали частные

производные уравнения (1) по каждому параметру:

$$\Delta h(\Delta D_m) = \frac{D_m}{4\sqrt{r_b^2 - D_m^2/4}} \Delta D_m, \quad (3)$$

$$\Delta h(\Delta d_m) = -\frac{d_m^2}{4\sqrt{r_b^2 - d_m^2/4}} \Delta d_m, \quad (4)$$

$$\Delta h(\Delta r_b) = \left[\frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 - d_m^2/4}} - \frac{r_b}{\sqrt{r_b^2 - D_m^2/4}} \right] \Delta r_b, \quad (5)$$

где d_m , D_m — средние значения внутреннего и внешнего диаметров сферообразной выемки.

В качестве НСП ΔD_m и Δd_m принимали погрешность микроскопа ΔM , НСП Δr_b — предельное отклонение $\Delta D_{wm} = \pm 60$ мкм для шаров класса G 200 (ГОСТ 3722–2014).

Суммарная методическая погрешность (доверительные границы) при доверительной вероятности 0,95 (ГОСТ Р 8.736–2011) составляет

$$\Delta_{\Pi}(\Delta d_m, \Delta D_m, \Delta r_b) = \pm 1,1(\Delta h^2(\Delta D_m) + \Delta h^2(\Delta d_m) + \Delta h^2(\Delta r_b))^{1/2}. \quad (6)$$

Для образцов, не удовлетворяющих условию плоскостности, составляющие НСП Δh оценивали на основе частных производных уравнения (2):

$$\Delta h(\Delta D_m) = \frac{\partial h(D_m)}{\partial D_m} \Delta D_m = \frac{1}{4} \left[\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_s} \right] D_m \Delta D_m, \quad (7)$$

$$\Delta h(\Delta d_m) = -\frac{1}{4} \left[\frac{1}{r_b} + \frac{1}{r_s} \right] d_m \Delta d_m, \quad (8)$$

$$\Delta h(\Delta r_b) = \frac{1}{8} (-D_m^2 - d_m^2) \frac{1}{r_b^2} \Delta r_b, \quad (9)$$

$$\Delta h(\Delta r_s) = \frac{1}{8} (-D_m^2 - d_m^2) \frac{1}{r_s^2} \Delta r_s. \quad (10)$$

Расчетные абсолютные (Δ_{Π}) и относительные (δ_{Π}) погрешности измерений толщины покрытий

Calculated values of the absolute (Δ_{Π}) and relative (δ_{Π}) errors of measuring coating thickness

D_b , мм	h , мкм	D_m , мм	d_m , мм	Δ_{Π} , мкм	δ_{Π} , %
15	5	0,75	0,50	0,3	6
	20	1,50	1,00	0,7	3,5
	100	3,30	2,20	1,5	1,5
30	5	1,05	0,7	0,2	4
	20	2,10	1,4	0,5	2,5
	100	4,64	3,1	1,0	1

Суммарная методическая погрешность в этом случае (доверительная вероятность 0,95)

$$\Delta_{\Pi}(\Delta d_m, \Delta D_m, \Delta r_b, \Delta r_s) = \pm 1,1(\Delta h^2(\Delta D_m) + \Delta h^2(\Delta d_m) + \Delta h^2(\Delta r_b) + \Delta h^2(\Delta r_s))^{1/2}. \quad (11)$$

В таблице приведены расчетные погрешности результатов измерений толщины покрытий в предположении, что $D/d = 3/2$.

Экспериментальный метод включал оценку повторяемости, воспроизводимости и правильности (ГОСТ Р ИСО 5725).

По данным испытаний определяли следующие показатели: среднее квадратическое отклонение и предел повторяемости результатов параллельных измерений; среднее квадратическое отклонение и предел воспроизводимости; границы интервала, в которых НСП методики находится с вероятностью 0,95; границы интервала, в которых погрешность любого из результатов измерений находится с вероятностью 0,95.

Повторяемость и воспроизводимость методики оценивали в трех лабораториях на соответствующих образцах. Экспериментальные точки располагались в начале, середине и конце диапазона измерений. Данные включали результаты 30 серий и 10 единичных измерений (в рамках каждой серии). Общее число серий между лабораториями распределяли равными долями.

Для оценки правильности использовали образцы, аттестованные с помощью государственного первичного эталона единиц поверхностной плотности и массовой доли элементов в покрытиях ГЭТ 168-201 (СП — 0,5–1,0, НСП — 0,3–2,0 %). Образцы исследовали с помощью эталонов сравнения (ГЭТ 168-2015), относительная погрешность аттестованного значения составляла 0,15–0,5 %.

Получили следующие значения показателей точности измерений толщины покрытия (доверительная вероятность — 0,95, диапазон измерений — 5–520 мкм), %: повторяемость σ_r (среднеквадратическое отклонение) — 2,8; воспроизводимость σ_R (среднеквадратическое отклонение) — 2,8; правильность $\pm \delta_c$ (границы систематической погрешности) — 5,6; точность $\pm \delta$ (границы погрешности, доверительная вероятность — 0,9) — 6,0.

Отметим, что в случае использования мелкодисперсной суспензии (как и шаров малого диаметра) формируются более ровные границы выемки. Хотя при этом значительно увеличивается время испытания, в процессе истирания следует уменьшать размер частиц в суспензии и финальную полировку проводить самым малым размером алмазов. При расчете толщины покрытия необходимо также учитывать уменьшение диа-

метра шара (повторное его использование исключено). Вместе с тем представляется, что шары больших диаметров малоэффективны вследствие неравномерности частоты вращения двигателя из-за большой массы.

Представленную методику можно применять при аттестации образцов произвольной геометрической формы (например, образцов износостойких покрытий на шаровых элементах запорной трубопроводной арматуры) [15]. Кроме того, согласно требованиям нормативов периодическая аттестация технологического процесса нанесения покрытия должна осуществляться с применением трех независимых методов измерения. Данную методику можно использовать в качестве одного из таких методов. С ее помощью можно также проводить измерения с высокой точностью на изделиях с нестабильными электромагнитными свойствами (на аустенитных нержавеющей сталях и др.).

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что представленная методика определения толщины покрытий методом шарового истирания может использоваться для технологического и выходного контроля широкого спектра покрытий (от лакокрасочных до сверхтвердых) толщиной от единиц до сотен микрометров. Ее можно применять в качестве референтного подхода при аттестации мер и настроечных образцов для различных типов электромагнитных толщиномеров. Преимущество методики — прямые измерения линейных размеров кратера, что минимизирует возможные погрешности, а также возможность испытаний без разрушения деталей и на образцах произвольной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Голубев С. С., Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. Структура и содержание метрологического обеспечения оценки соответствия характеристик при контроле качества покрытий / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 4. С. 71 – 74.
2. Голубев С. С., Бабаджанов Л. С., Гоголинский К. В., Сясько В. А. Актуальные вопросы метрологического обеспечения контроля качества покрытий / Законодательная и прикладная метрология. 2017. Т. 146. № 1. С. 19 – 23.
3. Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. Теория и практика. — М.: Издательство стандартов, 2004. — 264 с.
4. Потапов А. И., Сясько В. А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. — СПб: Гуманистика, 2009. — 1100 с.
5. Golubev S. S., Syasko V. A., Smirnova N. I., Gogolinsky K. V. Phase-sensitive eddy-current method of metallic coating thickness measurement. On question of calibration and verification of coating thickness gauges and metallic coating thickness standards / Proc. 55th Annual Conf. of Non-Destructive Testing (NDT). — Nottingham, UK, 2016. P. 166 – 174.

6. Голубев С. С., Смирнова Н. И., Складановская М. И. Обеспечение единства измерений толщины металлических покрытий вихретоковыми фазовыми толщиномерами при их градуировке и поверке / Измерительная техника. 2017. № 6. С. 25 – 28. DOI: 10.32446/0368-1025it.2017-6-25-28
7. Сясько В. А., Голубев С. С., Смородинский Я. Г. и др. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий / Дефектоскопия. 2018. № 10. С. 25 – 36. DOI: 10.1134/S0130308218100044.
8. Усеинов А. С., Гоголинский К. В., Решетов В. Н. Измерение механических свойств сверхтвердых алмазоподобных углеродных покрытий / Известия вузов. Серия: химия и химическая технология. 2011. Т. 54. № 7. С. 51 – 54.
9. Quinones-Salinas M. A., Mercado-Solis R. D. Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings / International Journal of Surface Science and Engineering. 2015. Vol. 9. N 6. P. 493 – 509. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072831.
10. Bomparola R., Caporali S., Lavacchi A., Bardi U. Silver electrodeposition from air and water-stable ionic liquid: An environmentally friendly alternative to cyanide baths / Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Issue 24. P. 9485 – 9490. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.04.008
11. Černý F., Pitter J., Konvičková S., Jech V. High temperature oxidation protective chromium-based coatings prepared by IBAD and PACVD methods / Surface and Coatings Technology. 2009. Vol. 203. P. 2566 – 2570. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.06.002
12. Corbella C., Rubio-Roy M., Bertran E., et al. Low friction and protective diamond-like carbon coatings deposited by asymmetric bipolar pulsed plasma / Diamond & Related Materials. 2009. N 18. P. 1035 – 1038. DOI: 10.1016/j.diamond.2009.01.003
13. Körber F.-J. The role of ion implantation in industrial sputtering processes for tribological applications / Surface and Coatings Technology. 1995. Vol. 74 – 75. P. 168 – 172. DOI: 10.1016/0257-8972(95)08362-6.
14. Rutherford K. L., Hutchings I. M. A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems / Surface and Coatings Technology. 1996. Vol. 79. Issue 1 – 3. P. 231 – 239. DOI: 10.1016/0257-8972(95)02461-1.
15. Рамазанов А. К., Ганеев А. А. Условия эксплуатации и требования к материалам трубопроводной арматуры нефтеперерабатывающей промышленности / Нефтегазовое дело. 2015. № 4. С. 313 – 325. DOI: 10.17122/ogbus-2015-4-313-325.

REFERENCES

1. Golubev S. S., Babadzhano L. S., Babadzhanova M. L. The Structure and Content of Metrological Assurance of Assessing the Conformity of Indicators upon Quality Control of Coatings. / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2017. Vol. 83. N 4. P. 71 – 74 [in Russian].
2. Golubev S. S., Babadzhano L. S., Gogolinsky K. V., Syasko V. A. Actual problems of metrological assurance of quality control of coatings / Zakonodat. Prikl. Metrol. 2017. Vol. 146. N 1. P. 19 – 23 [in Russian].
3. Babadzhano L. S., Babadzhanova M. L. Metrological support for coating thickness measurements. Theory and practice. — Moscow: Izd. Standartov, 2004. — 264 p. [in Russian].
4. Potapov A. I., Syasko V. A. Non-destructive methods and means of controlling the thickness of coatings and products. — St. Petersburg: Gumanistika, 2009. — 1100 p. [in Russian].
5. Golubev S. S., Syasko V. A., Smirnova N. I., Gogolinsky K. V. Phase-sensitive eddy-current method of metallic coating thickness measurement. On question of calibration and verification of coating thickness gauges and metallic coating thickness standards / Proc. 55th Annual Conf. of Non-Destructive Testing (NDT). — Nottingham, UK, 2016. P. 166 – 174.
6. Golubev S. S., Smirnova N. I., Skladanovskaya M. I. Providing the Uniformity of Measurements of the Thickness of Metallic Coatings by Eddy-Current Phase Thickness Gages During Their Calibration and Verification / Measurement Tech-

- niques. 2017. Vol. 60. N 6. P. 552 – 557. DOI: 10.1007/s11018-017-1233-0.
7. **Syasko, V. A., Golubev, S. S., Smorodinsky Ya. G., et al.** Measurement of Electromagnetic Parameters of Metal-Coating Thickness Measures / *Russ. J. Nondestruct Test.* 2018. Vol. 54. P. 698 – 710. DOI: 10.1134/S1061830918100091.
 8. **Useinov A. S., Gogolinsky K. V., Reshetov V. N.** Measurement of the mechanical properties of superhard diamond-like carbon coatings / *Izv. Vuzov. Ser. Khimiya Khim. Tekhnol.* 2011. Vol. 54. N 7. P. 51 – 54 [in Russian].
 9. **Quinones-Salinas M. A., Mercado-Solis R. D.** Comparative study of three methods for measuring thickness of PVD hard coatings / *International Journal of Surface Science and Engineering.* 2015. Vol. 9. N 6. P. 493 – 509. DOI: 10.1504/IJSURFSE.2015.072831.
 10. **Bomparola R., Caporali S., Lavacchi A., Bardi U.** Silver electrodeposition from air and water-stable ionic liquid: An environmentally friendly alternative to cyanide baths / *Surface and Coatings Technology.* 2007. Vol. 201. Issue 24. P. 9485 – 9490. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2007.04.008
 11. **Černý F., Pitter J., Konvičková S., Jech V.** High temperature oxidation protective chromium-based coatings prepared by IBAD and PACVD methods / *Surface and Coatings Technology.* 2009. Vol. 203. P. 2566 – 2570. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.06.002
 12. **Corbella C., Rubio-Roy M., Bertran E., et al.** Low friction and protective diamond-like carbon coatings deposited by asymmetric bipolar pulsed plasma / *Diamond & Related Materials.* 2009. N 18. P. 1035 – 1038. DOI: 10.1016/j.diamond.2009.01.003
 13. **Körber F.-J.** The role of ion implantation in industrial sputtering processes for tribological applications / *Surface and Coatings Technology.* 1995. Vol. 74 – 75. P. 168 – 172. DOI: 10.1016/0257-8972(95)08362-6.
 14. **Rutherford K. L., Hutchings I. M.** A micro-abrasive wear test, with particular application to coated systems / *Surface and Coatings Technology.* 1996. Vol. 79. Issue 1 – 3. P. 231 – 239. DOI: 10.1016/0257-8972(95)02461-1.
 15. **Ramazanov A. K., Ganeev A. A.** Conditions and requirements for materials of pipe fittings refining industry / *Oil and Gas Business.* 2015. N 4. P. 313 – 325. DOI: 10.17122/ogbus-2015-4-313-325 [in Russian].