

Основная погрешность (абсолютная), %	1,0
Диапазон массовой доли твердой фазы на входе/выходе скважины, %	0 – 100
Основная погрешность (абсолютная), %	1,5
Диапазон измерения расхода на входе, л/с	0 – 100
Основная погрешность, л/с	1,5
Диапазон измерения водоотдачи, см ³	4 – 20
Основная погрешность, см ³	1,0
Диапазон измерения степени засоленности, г/л	0 – 150
Основная погрешность, г/л	1,0
Диапазон измерения температуры, °С	0 – 80
Основная погрешность, °С	1,0
Диапазон измерения эффективной вязкости, мПа·с	1 – 25
Основная приведенная погрешность, %	2,5
Диапазон измерения газосодержания раствора, об. %	0 – 10
Основная погрешность, об. %	1,0
Диапазон температуры окружающей среды для датчиков плотности, массовой доли жидкой фазы и расхода, °С	-45 – +45
Диапазон температуры окружающей среды для датчиков водоотдачи, вязкости, степени минерализации и температуры раствора, °С	0 – +45
Диапазон температуры окружающей среды для пульта бурильщика, °С	-45 – +45
Диапазон температуры окружающей среды для пульта комплекса, °С	+10 – +35
Питание от сети переменного тока напряжением 220+22В и частотой 50+0,5Гц	
Тип исполнения датчиков комплекса – взрывобезопасный.	

Конструкция датчиков плотности и массовой доли жидкой фазы, содержащих радиоизотопные источники нейтронов и гамма-квантов, обеспечивает радиационную безопасность при эксплуатации их на буровых в соответствии с п.5-9 Основных санитарных правил ОСП-72/87 (требования к приборам технологического контроля).

Комплекс КИБР превосходит лучшие зарубежные (французская фирма "Geoservis") и отечественные аналоги (НПФ "Геофит" Восточной нефтяной компании) за счет того, что обеспечивает экспрессное измерение без отбора проб водоотдачи, вязкости и засоленности раствора в мернике, количества твердой фазы раствора в манифольде, желобе и после системы очистки, а также обнаруживает на ранней стадии проявления продуктивного пласта и распознает тип проявления (разгазирование или разбавление раствора). Комплекс прошел лабораторные испытания и метрологическую сертификацию и в настоящее время находится в опытно-промышленной эксплуатации на буровой ОАО СпецУБР Тюменской нефтяной компании.

УДК 620.179.15

911к
В. А. ЗАБРОДСКИЙ, В. Я. ГРОШЕВ, О. А. СИДУЛЕНКО, В. В. ВАРГА

ИЗМЕРЕНИЕ ТОЛЩИНЫ ЛЕГКИХ МЕТАЛЛОВ ПО ОБРАТНОМУ РАССЕЯНИЮ

Проведён анализ погрешностей измерения толщины покрытий из лёгких материалов при измерениях с помощью обратнорассеянного низкоэнергетического рентгеновского излучения. Изучен вклад мешающих факторов, рассмотрены основные схемы измерения для различных комбинаций элементов в системе покрытие – основа.

1. Лёгкие материалы

Толщину материалов по обратнорассеянному излучению в настоящее время измеряют в основном с использованием радиоизотопных источников излучения [1–3]. Однако при локальных измерениях толщины материала, особенно на изделиях сложной конфигурации и малых размеров, удельная активность радиоизотопных источников не всегда достаточна для обеспечения высокой производительности контроля. В таких случаях целесообразно использовать малогабаритные источники излучения

на основе рентгеновских трубок [4]. Напряжение анодного питания малогабаритных рентгеновских излучателей не превышает 40–50 кВ, поэтому применение обратнорассеянного рентгеновского излучения для измерения толщины ограничено, как правило, материалами с малым атомным номером.

Диапазон контролируемой толщины материала зависит от его состава, спектра излучения трубки, величины анодного напряжения.

При напряжениях на аноде трубки 10–30 кВ максимальная толщина графита, которая может быть измерена по обратнорассеянному излучению, находится в пределах 0,4–2 г/см². Диапазон измерения массовой толщины другого полимерного материала может быть оценён по отношению потока обратнорассеянного излучения от насыщенного слоя контролируемого материала к потоку обратнорассеянного излучения от насыщенного слоя графита. Для текстолита это отношение равно примерно 1,5 и соответственно диапазон измерения его толщины в 1,5 раза меньше, чем для графита при одинаковом напряжении на трубке.

Для полимерных материалов, состоящих из смеси элементов с малым атомным номером, суммарное массовое сечение рассеяния излучения при больших углах рассеяния практически не зависит от состава материала. В этом случае зависимости обратнорассеянных потоков излучения от толщины для материала, из которого изготовлены образцы, и для контролируемого материала практически одинаковы, если обеспечивается равенство потоков от насыщенных слоёв этих материалов, что достигается установкой соответствующего напряжения на рентгеновском излучателе. Для текстолита, плестигласа и графита величина этого напряжения равна соответственно 30, 26,8 и 22,4 кВ при использовании рентгеновской трубки 0,001БХЗ с молибденовым анодом.

Это обстоятельство позволяет использовать в рентгеновских толщиномерах комплект стандартных образцов, изготовленных из одного материала. Дополнительная погрешность при этом не превышает 2–3%. Погрешность измерения рентгеновского толщиномера зависит от измеряемой толщины материала. Её можно разделить на четыре основные составляющие: статистическую, динамическую, аппаратную и методическую. Первая обусловлена статистическим характером процесса генерации рентгеновского излучения, взаимодействия излучения с контролируемым материалом и регистрации излучения и проявляется в флуктуациях количества импульсов на выходе детектора.

Относительная статистическая погрешность измерения толщины материала одноканальным толщиномером определяется выражением

$$\delta t = \frac{\delta N}{S(t)}, \quad (1)$$

где $\delta N = 3/\sqrt{N}$ – относительная статистическая погрешность счёта; N – количество зарегистрированных фотонов; $S(t)$ – чувствительность к относительному изменению толщины материала:

$$S(t) = t \frac{\partial N}{\partial t} / N. \quad (2)$$

При постоянной статистической погрешности счёта N погрешность измерения, обусловленная статистической составляющей, возрастает с увеличением толщины материала. Использование фильтров первичного излучения позволяет значительно уменьшить Δt_{\min} вблизи верхнего предела диапазона измерения. Это обусловлено тем, что использование фильтров приводит к возрастанию чувствительности $S(t)$.

Динамическая погрешность толщиномера определяется его инерционностью и проявляется в толщиномерах технологического контроля из-за запаздывания выходной информации по отношению к входной. Она зависит от соотношения быстродействия толщиномера и скорости изменения нестационарного технологического процесса и может быть уменьшена сокращением длительности цикла измерения. При этом, однако, возрастает статистическая погрешность измерения. Основным источником аппаратной погрешности рентгеновского толщиномера является нестабильность анодного тока и анодного напряжения рентгеновского излучателя.

Рентгеновский толщиномер, построенный по одноканальной схеме, характеризуется высокой чувствительностью к изменению напряжения, причём в значительной мере это определяется изменением выхода излучения на аноде рентгеновской трубки. Использование алюминиевого фильтра толщиной 0,1 г/см² на пути первичного излучения примерно в 2 раза увеличивает эту чувствительность. Уменьшить чувствительность рентгеновского толщиномера к напряжению питания можно введением в него дополнительного детектора, следящего за интенсивностью излучения рентгеновского излучателя. При регистрации дополнительным детектором потока N_d излучения трубки и определении толщины по отношению потоков, зарегистрированных детекторами Д1 и Д2, чувствительность к напряже-

нию уменьшается в 2–6 раз, причём эффективно использование фильтров первичного излучения для устранения влияния питающего напряжения. С изменением анодного напряжения меняется не только величина потока первичного излучения на выходе излучателя, но и его спектральное распределение. Поэтому при построении рентгеновского толщиномера можно дополнительно уменьшить чувствительность к напряжению, так как спектр потока рентгеновского излучения, рассеянного мишенью в направлении дополнительного детектора, максимально приближен к спектру обратнорассеянного излучения, регистрируемого детектором Д1. В этом случае можно дополнительно уменьшить чувствительность к напряжению в 2–5 раз в зависимости от напряжения питания анода.

Основными источниками методической погрешности при измерении массовой толщины являются изменения неконтролируемых параметров объекта измерения, например, изменение состава материала, неравномерность толщины в пределах контролируемого участка, изменение формы контролируемых изделий и др.

При измерении линейной толщины основным источником методической погрешности является также изменение плотности. Снижение составляющих методической погрешности, обусловленных изменением формы изделия и неравномерностью толщины, в рентгеновском толщиномере достигается уменьшением величины контролируемого участка, а составляющих погрешностей вследствие изменений состава и плотности материала – введением дополнительных корректирующих каналов. Погрешность измерения линейной толщины материала переменной плотности можно уменьшить использованием двухканального метода измерения.

Поток обратнорассеянного излучения, зарегистрированный детектором Д1, можно представить в виде:

$$N_1 = N_\infty [1 - \exp(-\mu_{\text{эфф}1} \rho d)], \quad (3)$$

где $\mu_{\text{эфф}1} = (\mu_{\text{эфф}} + \mu_{\text{сэфф}} / \cos \alpha)$ – суммарный эффективный коэффициент ослабления материала для излучения, зарегистрированного детектором Д1; ρ – плотность материала; α – угол регистрации рассеянного излучения; $N_2 = N_\infty \{1 - \exp[-\mu_{\text{эфф}2} (d - h \text{ctg} \alpha) \rho]\} \exp(-\mu_{\text{эфф}2} \rho h \text{ctg} \alpha)$ – эффективный коэффициент ослабления первичного и рассеянного излучения соответственно.

Поток зарегистрированный детектором Д2:

$$N_2 = N_\infty \{1 - \exp[-\mu_{\text{эфф}2} (d - h \text{ctg} \alpha) \rho]\} \exp(-\mu_{\text{эфф}2} \rho h \text{ctg} \alpha), \quad (4)$$

где $\mu_{\text{эфф}2}$ – суммарный эффективный коэффициент ослабления для излучения, зарегистрированного детектором Д2; h – ширина торца коллиматора, ограничивающего поток рассеянного излучения в направлении детектора Д2.

Если считать, что $\mu_{\text{эфф}1} = \mu_{\text{эфф}2} = \mu_{\text{эфф}}$, то

$$N_p = N_1 - N_2 = N_\infty \{1 - \exp[-\mu_{\text{эфф}} (d - h \text{ctg} \alpha)]\}. \quad (5)$$

Из соотношений (3) и (5) получим

$$\mu_{\text{эфф}} \rho d = -\ln(1 - N_1 / N_\infty); \quad (6)$$

$$\mu_{\text{эфф}} \rho = -\ln(1 - N_1 / N_\infty) / h \text{ctg} \alpha. \quad (7)$$

Используя соотношения (6) и (7), определяем толщину

$$d = \ln(1 - N_1 / N_2) h \text{ctg} \alpha / \ln(1 - N_p / N_\infty). \quad (8)$$

Влияние изменений напряжения питания анода трубки на результат измерения толщины материала при двухканальном методе измерения аналогично влиянию изменений напряжений при измерении плотности материала двухканальным методом. Уменьшение погрешности измерения толщины материала как двухканальным, так и одноканальным толщиномерами достигается:

- 1) повышением напряжения на аноде трубки и фильтрацией первичного пучка излучения;
- 2) повышением стабильности анодного напряжения, которая в 10–15 раз должна быть выше требуемой точности измерения;
- 3) введением в толщиномер дополнительного детектора, позволяющего не менее чем в 10 раз уменьшить требования к стабильности анодного напряжения.

2. Основы измерения толщины медного покрытия

При толщине медного покрытия более 25 мкм чувствительность толщиномера к изменению толщины покрытия выше, чем к изменению толщины основы, а относительная погрешность измерения толщины покрытия меньше относительного изменения толщины основы.

Чувствительность рентгеновского толщиномера S_{Π} в значительной мере определяется величиной напряжения питания рентгеновской трубки. Измерение толщины покрытия по обратнорассеянному излучению в области малой толщины целесообразно проводить при низких напряжениях на рентгеновской трубке.

С ростом толщины покрытия для обеспечения более высокой чувствительности рентгеновского толщиномера к толщине покрытия напряжение на трубке необходимо увеличивать. Чувствительность рентгеновского толщиномера никелевых покрытий на сплавах алюминия, измеряющего толщину по обратнорассеянному излучению, в области толщины покрытия, меньшей 10 мкм, меньше, чем чувствительность толщиномера, измеряющего покрытие по величине характеристического излучения покрытия. Поэтому в области малой толщины наиболее целесообразно использование рентгенофлуоресцентных толщиномеров, а в области большой – альбедных. Диапазон измерения толщины покрытий, расположенных на лёгких подложках, по обратному рассеянию излучения существенно превышает диапазон измерения толщины покрытий по характеристическому излучению.

Так, доступная контролю по характеристическому излучению меди толщина медного покрытия не превышает 30 мкм, а по рассеянному излучению на текстолитовой основе достигает 150 мкм, на железной основе – 90 мкм.

Рентгеновский толщиномер, измеряющий покрытие по потоку обратнорассеянного излучения, характеризуется более высокой чувствительностью к изменению напряжения питания анода рентгеновской трубки, чем рентгенофлуоресцентный. С ростом толщины покрытия чувствительность рентгеновского толщиномера к изменению напряжения возрастает.

Уменьшение влияния колебаний анодного напряжения на результат измерения толщины покрытия достигается при использовании в качестве информационного параметра отношения потоков характеристического и рассеянного излучений или использованием в толщиномере измерительного преобразователя с дополнительным детектором.

Поток характеристического излучения покрытия возрастает с увеличением его толщины и достигает насыщения, обусловленного тем, что фотоны, возникающие в глубине покрытия, практически не приходят к детектору.

3. Измерение толщины покрытий из металлов

При облучении покрытия и основы низкоэнергетическим рентгеновским излучением происходят два процесса взаимодействия фотонов с веществом: рассеяние и фотоэлектрическое поглощение. Фотопоглощение сопровождается выходом фотонов характеристического излучения материалов покрытия и основы.

Величина потока обратнорассеянного излучения для комбинации основа–покрытие при падении первичного излучения перпендикулярно поверхности покрытия описывается соотношением [6]

$$N(dn) = N_{\infty 0} \{1 - \exp[-\mu_0 \rho_0 d_0 (1 + \mu_{0s} / \mu_0 \sin \psi)]\} \exp[-\mu_{\Pi} \rho_{\Pi} d_{\Pi} (1 + \mu_{\Pi s} / \mu_{\Pi} \sin \psi)] + N_{\infty \Pi} \{1 - \exp[-\mu_{\Pi} \rho_{\Pi} d_{\Pi} (1 + \mu_{\Pi s} / \mu_{\Pi} \sin \psi)]\}, \quad (9)$$

где $N_{\infty \Pi}, N_{\infty 0}$ – поток обратнорассеянного излучения от материала покрытия насыщенной толщины и основы соответственно; ρ_{Π}, d_{Π} – плотность и толщина покрытия; μ_0, μ_{0s} – эффективные массовые коэффициенты ослабления материалом основы первичного и рассеянного излучения соответственно; $\mu_{\Pi}, \mu_{\Pi s}$ – эффективные массовые коэффициенты ослабления материалом покрытия первичного и рассеянного излучения; ψ – угол между направлением пучка рассеянного излучения и поверхностью контролируемого изделия.

Для полихроматического первичного излучения коэффициенты ослабления $\mu_0, \mu_{\Pi}, \mu_{0s}, \mu_{\Pi s}$ в общем случае являются функцией толщины покрытия. При низких напряжениях на рентгеновской трубке отношения μ_{0s} / μ_0 и $\mu_{\Pi s} / \mu_{\Pi}$ практически не зависят от материала рассеивателя и напряжения.

Характер зависимости $N(d)$ от толщины покрытия и чувствительность метода измерения толщины покрытия по обратнорассеянному излучению определяются соотношением $N_{\infty 0}$ и $N_{\infty \Pi}$.

Покрытие, атомный номер которого меньше атомного номера материала основы, обладает лучшими рассеивающими свойствами, чем основа. Поток рассеянного излучения в этом случае является возрастающей функцией от толщины покрытия, а чувствительность рентгеновского толщиномера к изменению толщины покрытия тем сильнее, чем больше разность атомных номеров покрытия Z_{Π} и основы Z_0 . При большой разности Z_{Π} и Z_0 , имеющей место при контроле толщины полимерных покрытий на металлической основе, чувствительность толщиномера покрытий к изменению толщины покрытия приближается к чувствительности рентгеновского толщиномера плёночных материалов из элементов покрытия. Диапазон контролируемой толщины покрытий и погрешность измерения толщины по величине потока обратнорассеянного излучения зависят от напряжения на трубке и соотношения атомных номеров материалов покрытия и подложки. Наибольший диапазон и наименьшая погрешность достигаются при контроле полимерных покрытий на металлической основе [7].

Если атомный номер материала покрытия больше атомного номера материала основы, то поток обратнорассеянного излучения уменьшается с ростом толщины покрытия. Максимальная чувствительность и максимальный диапазон измерения толщины покрытий с большим атомным номером достигаются на подложках из лёгких материалов. При этом на погрешность измерения оказывают влияние колебания толщины основы. Экспериментальная зависимость чувствительностей рентгеновского толщиномера $S_0 = d_0 \frac{\partial N}{\partial d_0} / N$ и $S_{\Pi} = d_{\Pi} \frac{\partial N}{\partial d_{\Pi}} / N$ от толщины текстолитового покрытия при его облучении полихроматическим излучением имеет вид

$$N(E_i, d) = \int_{E_{гП}}^{E_0} \frac{N_0(E) \tau_{\Pi}(E) \omega_{qi}}{4\pi R^2 (\mu_{\Pi} / \sin \varphi + \mu_{\Pi i} / \sin \psi)} \cdot \frac{S_{q\Pi} - 1}{S_{q\Pi}} \cdot \frac{1}{\sin \varphi} \{1 - \exp[-\rho_{\Pi} d_{\Pi} (\mu_{\Pi} / \sin \varphi + \mu_{\Pi i} / \sin \psi)]\} dE, \quad (10)$$

где $E_{гП}$ – энергия края поглощения q -уровня элемента покрытия; E_0 – максимальная энергия спектра излучения; $\tau_{\Pi}(E)$ – массовое сечение фотопоглощения на q -оболочке элемента покрытия; μ_{Π} и $\mu_{\Pi i}$ – массовый коэффициент ослабления для первичной и i -й линии характеристического излучения соответственно в материале покрытия; ω_{qi} – флуоресцентный выход i -й линии материала покрытия; S_q – скачок поглощения q -уровня материала покрытия; φ и ψ – углы между поверхностью контролируемого изделия и направлением пучков первичного и характеристического излучения; R – расстояние от поверхности изделия до детектора; ρ и d_{Π} – соответственно плотность и толщина покрытия.

Поток характеристического излучения основы уменьшается с ростом толщины покрытия и описывается соотношением:

$$N(E_j, d_{\Pi}) = \int_{E_{q\Pi}}^{E_0} \frac{N_0(E) \tau_0(E) \omega_{qj}}{4\pi R^2 (\mu_0 / \sin \varphi + \mu_{0j} / \sin \psi)} \cdot \frac{S_{q0} - 1}{S_{q0}} \cdot \frac{1}{\sin \varphi} \{1 - \exp[-\rho_{\Pi} d_{\Pi} (\mu_{\Pi} / \sin \varphi + \mu_{\Pi j} / \sin \psi)]\} dE, \quad (11)$$

где μ_0 – коэффициент ослабления возбуждающего излучения в материале основы; μ_0, μ_{0j} – массовые коэффициенты ослабления j -й линии характеристического излучения основы в самой основе и покрытии соответственно.

Из выражений (10) и (11) оцениваем максимальные значения толщины покрытий, которые можно измерять рентгенофлуоресцентным методом. Предельную толщину покрытия, которая может быть измерена по характеристическому излучению покрытия, находят из соотношения $\frac{N(d_{\Pi})}{N(\infty)} = 0,95$ [5].

Она определяется как энергией пучка возбуждающего излучения, так и энергией характеристического излучения материала покрытия. Увеличение диапазона контролируемой толщины покрытий достигается повышением напряжения на рентгеновской трубке, а также использованием фильтров поглощения первичного излучения, что сдвигает спектр излучения в сторону больших энергий. В зависимости от толщины покрытия для измерения можно использовать характеристическое излучение как основы, так и покрытия.

При малой толщине серебряного покрытия (до 5–7 мкм) большая чувствительность достигается использованием характеристического излучения основы. Если регистрация характеристического излучения меди осуществляется неспектрометрическим детектором, то напряжение на аноде трубки следует задавать меньше энергии скачка поглощения серебра, так как для напряжений больших энергий скачка поглощения серебра одному значению суммарного потока характеристического излучения покрытия и основы могут соответствовать две толщины покрытия. Поэтому в практической реализации

рентгенофлуоресцентного метода измерения толщины покрытия по характеристическому излучению элемента с меньшим атомным номером анодное напряжение необходимо устанавливать в зависимости от атомных номеров покрытия, основы и используемого метода регистрации излучения. При диапазоне измерений больше 5 мкм следует использовать характеристическое излучение серебра, обладающего большей проникающей способностью. При регистрации характеристического излучения серебра неспектроскопическим детектором вклад характеристического излучения меди легко устраняется использованием алюминиевого поглощающего фильтра толщиной 0,3 мм. При этом уменьшение потока излучения серебра составляет не более 30%. Большая чувствительность к толщине покрытия, а также уменьшение влияния характеристик пучка возбуждающего излучения достигается определением толщины покрытия по отношению величины характеристического излучения покрытия и основы, что требует использования спектрометрического метода регистрации.

На величину потока характеристического излучения покрытия оказывает влияние процесс возбуждения элемента покрытия характеристическим излучением основы, если $Z_0 > Z_{\text{П}}$, а также рассеянным в основе излучением, если она состоит из элементов с малым атомным номером [13, 15].

Для покрытий, расположенных на металлической основе, процесс возбуждения характеристическим излучением основы практически не влияет на точность измерения толщины покрытия при колебаниях толщины основы вследствие малой проникающей способности в материале основы первичного низкоэнергетического излучения и характеристического излучения основы. Погрешность измерения толщины покрытий, расположенных на основе из лёгких материалов, определяется толщиной покрытия, колебаниями толщины и состава основы. Наибольшая погрешность, обусловленная процессом возбуждения покрытия рассеянным излучением, наблюдается при большей толщине покрытия, когда величина потока характеристического излучения покрытия приближается к участку насыщения зависимости этого потока от толщины покрытия [13], а также при малой толщине основы в сравнении с толщиной насыщения для материала основы при облучении его первичным излучением.

Наименьшая погрешность измерения при измерении состава и толщины основы достигается использованием первичного излучения, энергия которого максимально приближена к энергии края поглощения элементов покрытия. Однако снижение энергии первичного излучения уменьшает диапазон контролируемой толщины.

Наличие процесса возбуждения материала покрытия излучением, отражённым от основы, приводит к необходимости переградуировки рентгеновских флуоресцентных толщиномеров для каждой комбинации покрытие–основа. Рассеянное излучение и характеристическое излучение элементов покрытия используют и при измерении многослойных покрытий, причём с увеличением числа слоёв задача послойного измерения толщины значительно усложняется.

Если измеряется двухслойное покрытие, то можно регистрировать характеристическое излучение материала основы, а также характеристическое излучение верхнего и нижнего слоёв. Для определения толщины каждого слоя достаточно провести два измерения. Выбор того или иного характеристического излучения определяется атомными номерами элементов покрытий и диапазоном толщин, энергией возбуждающего излучения, типом используемого детектора.

Если атомные номера покрытий уменьшаются от основы к верхнему слою, то целесообразно использовать характеристическое излучение основы и нижнего слоя, если увеличиваются, то – характеристическое излучение покрытий.

Определение толщины покрытий можно проводить по номограммам, которые представляют собой пересекающиеся семейства графиков функций потока излучения от толщины слоёв в координатах толщины двух слоёв с определённым шагом по интенсивности [14]. Однако метод номограмм обладает ограниченной точностью, так как из-за небольшого числа образцов необходимо прибегать к интерполяции при построении номограмм.

В работе [8] толщина двухслойных покрытий с близкими атомными номерами (Cu + Ni) измерена без использования номограмм. Толщина верхнего медного покрытия определялась по потоку характеристического излучения меди, толщина никелевого покрытия – по градуировочной зависимости потока излучения стальной основы от суммарной поверхностной плотности покрытий вычитанием толщины медного покрытия.

Наблюдается удовлетворительное согласие результатов, полученных гравиметрическим и рентгенофлуоресцентным методами. Значительное повышение точности измерения двухслойных покрытий по характеристическому излучению элементов покрытия достигается при использовании в рентгеновских толщиномерах вычислительных устройств, позволяющих существенно ускорить процесс определения толщины каждого из слоёв и уменьшить количество стандартных образцов покрытий, необходимых для градуировки прибора.

Обратнорассеянное излучение для измерения толщины двухслойных покрытий может быть использовано только в случае основы из лёгких материалов, например, для двухслойного покрытия из олова и меди на текстолитовой подложке. Определение толщины оловянного покрытия производится по характеристическому излучению олова, толщина медного подслоя – по рассеянному излучению. Погрешность измерения толщины медного покрытия на текстолите в диапазоне 30–50 мкм составляет ± 3 мкм. Погрешность измерения оловянного покрытия – ± 1 мкм в диапазоне до 10 мкм. Колебания толщины основы приводят к возрастанию погрешности измерения медного слоя.

Покрытия сложного состава, получаемые методом гальванического или термовакуумного осаждения, а также плазменным напылением, имеют непостоянный состав. Колебание состава покрытий оказывает влияние на результат измерения толщины вследствие изменения поглощающей способности материала покрытия при измерении по обратнорассеянному или по флуоресцентному излучению элемента подложки, а также взаимного влияния элементов покрытия на выходящий из покрытия поток излучения.

Определение толщины покрытия и концентрации каждого элемента в двухкомпонентном покрытии сводится к решению нелинейного уравнения вида [15, 16]:

$$d_{\Pi} = X(N_1, N_2),$$

$$C = Y(N_1, N_2),$$

где N_1 и N_2 – число зарегистрированных за время измерения фотонов характеристического излучения первого и второго компонентов покрытия соответственно.

При малой толщине покрытий используется линейная аппроксимация функций X и Y . С ростом толщины покрытий для повышения точности определения учитывается экспоненциальный характер функций X и Y , при этом нахождение функций X и Y связано с большим объёмом вычислений.

Измерение толщины покрытий, состоящих из смеси большого количества элементов, может быть проведено с использованием детекторов, например, сцинтилляционных, имеющих недостаточную разрешающую способность для выделения энергетических линий, входящих в покрытие элементов. В этом случае о толщине покрытия судят по суммарной интенсивности флуоресцентного излучения всех элементов.

Нестабильность относительного состава сложных покрытий, например, Cd–In–Sn, Cu–Ag–St, Cr–Fe–Ni, Ni–Cu–Ga, изменяет суммарную интенсивность флуоресцентного излучения вследствие разной эффективности возбуждения элементов с разными атомными номерами [13].

Рассмотрим многокомпонентную смесь элементов с атомными номерами Z_1, Z_2, \dots, Z_n . В целях упрощения наложим следующие ограничения. Интенсивности первичного и вторичного излучений измеряются на поверхности покрытия; рассматривается только излучение $k_{\alpha 1}, k_{\alpha 2}, k_{\beta 1}$ – линий; первичное излучение и вызывающее избирательное возбуждение являются монохроматическими, принимаем во внимание флуоресценцию первого и второго порядка возбуждения. Тонкий мононаправленный пучок первичного излучения с энергией E_0 падает на покрытие толщиной d_{Π} по нормали к его поверхности, вторичное излучение выходит под углом ψ к плоскости покрытия. Система координат выбрана так, что направление оси z совпадает с направлением падения первичного пучка, а облучаемая поверхность лежит в плоскости XOY . Первичное излучение, поглощаясь в слое $z_1, z_1 + dz_1$, возбуждает в нём линию j элемента k , концентрация которого в смеси равна C_k . Часть этого излучения с энергией E_{jk} распространяясь по всем направлениям, выходит из покрытия (интенсивность флуоресценции первого порядка), а часть возбуждает в слое $z_2, z_2 + dz_2$ линию i элемента l с концентрацией C_l . Излучение, возникшее в слое $z_2, z_2 + dz_2$ и вышедшее из покрытия, составляет интенсивность флуоресценции второго порядка.

Введём следующие обозначения: I – интенсивность первичного излучения вблизи покрытия; I_2 и ΔI_2 – интенсивности линий возбуждения, связанные соответственно с непосредственным возбуждением, первичным излучением и эффектом избирательного возбуждения; μ, μ_j, μ_i – массовые коэффициенты ослабления соответственно первичного излучения, линии j , вызывающей избирательное возбуждение, и линии i , возбуждаемой линией j ; τ_k, τ_{ji} – массовые сечения фотоэффекта, соответственно квантов первичного излучения на элементе k и квантов линии j на элементе l ; E, E_{jk}, E_{il} – энергии первичного излучения, линии j элемента k и линии i элемента l ; $S_k, \omega_k, S_l, \omega_l$ – величины K -скачка и выхода флуо-

ресценции элементов k и l ; P_{jk}, P_{il} – вероятности испускания линии j элемента k и линии i элемента l ; ρ_{Π} – плотность покрытия.

Интенсивность j -й линии флуоресценции первого порядка возбуждения для произвольного элемента покрытия k запишется в виде

$$I_{2k} = I \frac{C_k \tau_k (S_k - 1) \omega_k P_{jk} E_{jk}}{4\pi S_k (\mu_0 + \mu_j / \sin \psi) E} \{1 - \exp[-\rho_{\Pi} d_{\Pi} (\mu + \mu_j / \sin \psi)]\}, \quad (12)$$

где $\mu = \sum_{q=1}^n \mu_q C_q$; $\mu_j = \sum_{q=1}^n \mu_{jq} C_q$, n – количество элементов покрытия, возбуждаемых первичным излучением.

Суммарную интенсивность флуоресценции первого порядка получим суммированием по индексам k, j :

$$I_2 = \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^S I_{2k}^j, \quad (13)$$

где S – количество рассматриваемых линий возбуждения.

Дифференциальную интенсивность i -й линии элемента l , возбуждаемой j -й линией элемента k в объёме $dv = dx_2 dy_2 dz_2$ запишем в виде

$$dI_{2kl}^{ij} = I \rho_{\Pi}^2 \frac{\tau_k \tau_{jl} (S_k - 1) (S_l - 1) \omega_k \omega_l P_{jk} P_{il}}{16\pi^2 S_k S_l E} \cdot C_k C_l E_{il} \exp(-\mu \rho z_1) dz_1 \frac{1}{R^2(z_1, x_2, y_2, z_2)} \times \\ \times \exp[-\rho_{\Pi} \mu_j R(z_1, x_2, y_2, z_2)] \exp(-\rho_{\Pi} \mu_i z_2 / \sin \psi) dv, \quad (14)$$

где $R = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + (z_1 - z_2)^2}$, $\mu_i = \sum_{q=1}^n \mu_{iq} C_q$.

Переходя к цилиндрической системе координат и в силу осевой симметрии, интегрируя по азимутальному углу φ , получим

$$\Delta I_{2kl}^{ij} = \frac{I \rho_{\Pi}^2}{8\pi} f \int_0^{d_{\Pi}} \exp(-\mu \rho_{\Pi} z_1) dz_1 \int_0^{\infty} \frac{\exp(-\mu \rho_{\Pi} \sqrt{r^2 + (z_1 - z_2)^2} r) dr}{r^2 + (z_1 - z_2)^2} \int_0^{d_{\Pi}} \exp(-\mu_i \rho_{\Pi} z_2) dz_2, \quad (15)$$

где $f = \frac{\tau_k \tau_{jl} (S_k - 1) (S_l - 1) \omega_k \omega_l P_{jk} P_{il} C_k C_l E_{il}}{S_k S_l E}$.

Суммарная интенсивность флуоресценции второго порядка получается суммированием по индексам k, l, j, i :

$$\Delta I_2 = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{j=1}^S \sum_{i=1}^S \Delta I_{2kl}^{ij}. \quad (16)$$

Интегрирование выражения (16) проводится численно с использованием кубатурных формул Гаусса. При верхнем пределе интегрирования по r , равном трём длинам пробега квантов линии в материале покрытия, погрешность интегрирования не превышает 5%.

Относительный вклад ε_l избирательного возбуждения в суммарную интенсивность флуоресценции определяется по отношению $\varepsilon_l = \Delta I_2 / I_2$.

По аналогичной методике определяется поток числа квантов k - флуоресценции первого N_2 и второго ΔN_2 порядка возбуждения, а также относительного вклада $\varepsilon_N = \Delta N_2 / N_2$ избирательного возбуждения в суммарный поток флуоресценции. Влияние относительного содержания элементов в покрытии на суммарную интенсивность и поток флуоресценции покрытия можно определить по соотношениям:

$$\delta_I = \left(\frac{I_2}{I_{2s}} - 1 \right) 100\%, \quad \delta_N = \left(\frac{N_2}{N_{2s}} - 1 \right) 100\%; \\ \delta_{I_e} = \left(\frac{I_2 + \Delta I_2}{I_{2s} + \Delta I_{2s}} - 1 \right) 100\%, \quad \delta_{N_e} = \left(\frac{N_2 + \Delta N_2}{N_{2s} + \Delta N_{2s}} - 1 \right) 100\%, \quad (17)$$

где δ_I , δ_N , δ_{I_s} , δ_{N_s} – относительные флуктуации интенсивности и потока флуоресценции соответственно без учёта и с учётом вклада избирательного возбуждения; I_2 , ΔI_2 , N_2 , ΔN_2 – суммарные интенсивности и потоки флуоресценции первого и второго порядка возбуждения. Индекс s означает, что соответствующее значение вычислено для образца, относительно которого определяются флуктуации.

Вклад избирательного возбуждения ϵ_I определяется, по крайней мере, тремя обстоятельствами: типом покрытия (интервалом уровней энергий k -краёв поглощения элементов, входящих в его состав), поверхностной плотностью m и соотношением концентраций элементов в покрытии. Наиболее сильно этот эффект проявляется в покрытиях Ni–Cu–Ga и Cr–Fe–Ni, когда возбуждение флуоресценции второго порядка обусловлено действием всех наиболее ярких линий k -спектра $k_{\alpha 1}, k_{\alpha 2}, k_{\beta 1}$. В этом случае доля интенсивности флуоресценции, обусловленная избирательными эффектами, может достигать значительной величины (30–40%). С уменьшением различия атомных номеров элементов покрытия происходит сближение уровня энергий k -краёв поглощения, в результате чего в процессе дополнительного возбуждения участвуют менее яркие линии k -спектра, и вклад избирательного возбуждения падает (для Cd–In–Sn-покрытия его значение не превышает 7,5%). При большом различии атомных номеров элементов покрытия избирательные эффекты ещё менее заметны. Для покрытия Cu–Ag–Sn, максимальное различие атомных номеров элементов которого составляет 21 единицу, вторичная флуоресценция обусловлена выходом квантов характеристического излучения меди и серебра. Однако вклад избирательного возбуждения здесь невысок (не более 3%), так как низкоэнергетичное излучение k -линии Cu сильно поглощается в материале покрытия, а довозбуждение серебра оловом происходит с малой эффективностью.

Расчёты относительных флуктуаций интенсивности и потока флуоресценции выполнялись по соотношению (17) без учёта и с учётом вклада избирательного возбуждения. Флуктуации определялись относительно образцов рассматриваемых покрытий состава 35–30–35%. Толщина покрытия Cd–In–Sn принималась равной 80 мг/см², а всех остальных 20 мг/см². Как показали расчёты, максимальный уровень флуктуации интенсивности и потока флуоресценции достигается при перераспределении концентраций между крайними элементами для всех покрытий, поэтому представленные результаты относятся к наиболее неблагоприятному, с точки зрения точности контроля, случаю, когда концентрация среднего по атомному номеру элемента остаётся неизменной ($C_2=30\%$), а содержание крайних элементов изменяется в пределах 10–60%.

Полученные данные позволяют выявить степень флуктуаций интенсивности и потока флуоресценции при вариациях состава в различных пределах, оценить влияние вклада избирательного возбуждения на флуктуации и сравнить результаты, полученные для флуктуации интенсивности и потока, что в практических случаях соответствует различным режимам регистрации излучения.

Варьирование состава в сравнительно больших пределах не приводит к заметному изменению интенсивности и потока суммарной флуоресценции лишь для покрытия Cd–In–Sn, в остальных случаях они значительно больше. При изменении концентрации крайних элементов в пределах $\pm 10\%$ флуктуации интенсивности и потока флуоресценции заметно уменьшаются и характеризуются значением, не превышающим $\pm 6\%$ для покрытия Cu–Ag–Sn. Вклад избирательного возбуждения для Cr–Fe–Ni-покрытия увеличивает флуктуацию, в остальных случаях наоборот – уменьшает, причём если для оценки возможности контроля покрытия Cu–Ag–Sn вкладом избирательного возбуждения можно пренебречь (достаточно использовать значения интенсивности и потока флуоресценции первого порядка возбуждения), то для покрытий Cr–Fe–Ni, Cd–In–Sn и Ni–Cu–Ga такой учёт необходим. Для всех рассматриваемых покрытий влияние вариаций состава на величину суммарного потока числа квантов флуоресценции выражено меньше, чем на величину интенсивности.

Уменьшить влияние флуктуаций состава на погрешность измерения толщины покрытия можно использованием способа измерений, при котором излучение покрытия направляется на вторичную мишень, после чего проводится регистрация только флуоресцентного излучения мишени [9, 10].

Если эффективность возбуждения элементов покрытия первичным излучением растёт с атомным номером как Z^5 , а эффективность возбуждения материала мишени падает с увеличением энергии возбуждающего излучения как E^{-3} , следует ожидать меньшей флуктуации потока флуоресценции мишени по сравнению с флуктуациями суммарного потока флуоресценции покрытия, так как большему по атомному номеру элементу покрытия соответствует и большая энергия возбуждаемых линий флуоресценции, а излучение этого элемента с меньшей эффективностью возбуждает материал мишени, чем излучение элемента с меньшим атомным номером. Предполагая, что материал вторичной мишени содержит только один излучающий элемент и её толщина является слоем насыщения для линии флуорес-

ценции этого элемента, аналитическое выражение для потока j -й линии флуоресценции мишени, возбуждаемой излучением i -й линии элемента покрытия n , можно записать в виде

$$N_{mj} = N_{\Pi i}^n \frac{\omega_q^M (S_q^M - 1) P_j^M \tau_j^M}{4\pi S_q^M} \cdot \frac{1}{\frac{\mu_{iM}}{\sin \varphi_M} + \frac{\mu_{jM}}{\sin \psi_M}}, \quad (18)$$

где индекс m соответствует материалу мишени; P_j^M – вероятность радиационного перехода с испусканием линии j -го элемента мишени; τ_j^M – массовый коэффициент истинного поглощения линии i -го элемента покрытия n в элементе мишени; μ_{jM} – массовый коэффициент ослабления линии j -го элемента мишени в материале мишени; S_q^M – скачок поглощения для q - уровня материала мишени; $N_{\Pi i}^n$ – поток излучения i -го элемента покрытия.

Суммированием по индексам n, j, i получим полный поток флуоресценции мишени, возбуждаемой излучением покрытия

$$N_M = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^s N_{mj}.$$

Относительные флуктуации флуоресцентного излучения мишени находились по соотношению

$$\delta_M = \frac{N_M - N_{\text{МОБ}}}{N_{\text{МОБ}}} 100\%, \quad (19)$$

где $N_{\text{МОБ}}$ – поток флуоресценции мишени, возбуждаемый излучением образца покрытия, относительно которого определялись флуктуации (состав 35–30–35%).

Материал вторичных мишеней выбирался из диапазона $23 \leq Z \leq 27$ для Cu–Ag–Sn-покрытия, $23 \leq Z \leq 26$ для Ni–Cu–Ga-покрытия и $40 \leq Z \leq 44$ для Cd–In–Sn-покрытия.

Сравнение показывает, что при изменении относительного состава покрытия флуктуации потока флуоресценции, возбуждаемой в материале мишени, существенно ниже, чем флуктуации потока флуоресценции, возбуждаемой в материале покрытий. Выбор материала мишени наиболее существенно сказывается при контроле Cu–Ag–Sn-покрытия. Так, если при использовании кобальтовой мишени влияние состава уменьшается в 3 раза, то в случае ванадиевой мишени – десятикратный выигрыш. Для оставшихся покрытий наблюдается ослабление влияния нестабильности относительного состава при использовании вторичных мишеней не менее чем в 2 раза. Однако зависимость флуктуаций от Z -мишени в этих случаях выражена слабее, причём если для Ni–Cu–Ga-покрытия флуктуации несколько увеличиваются с ростом Z -мишени, то для Cd–In–Sn-покрытия, напротив, уменьшаются.

Возможности рассмотренного метода измерений поверхностной плотности многокомпонентных покрытий исследовались экспериментально на образцах Cu–Ag–Sn-покрытий, напылённых на стеклянные пластины, так как эффективность использования вторичных мишеней наиболее заметна именно для этого материала. Плёнки покрытий получали термовакуумным испарением сплавов с заданными составами 110–30–60%, 35–30–35%, 60–30–10%. Исходные сплавы имели одинаковую массу 5 г, что было достаточно для получения покрытий с поверхностной плотностью до 10 мг/см² на площади напыления 30 см². Полученные покрытия облучали излучением с энергией 60 кэВ.

Поток флуоресценции регистрировался сцинтилляционным детектором на основе кристалла NaI(Tl) толщиной 2 мм. Детектор имел входное окно из бериллия толщиной 0,3 мм. Эффективность регистрации вторичного излучения в этом случае близка к 100% и слабо зависит от спектрального состава регистрируемого излучения.

По измеренным значениям потоков суммарной флуоресценции покрытий определяли величину их относительных флуктуаций δ_{Π} , в этом случае детектор устанавливали в месте расположения мишени. В качестве образца сравнения выбирали покрытие, напылённое из сплава с составом 35–30–35%. Значения δ_{Π} для покрытий, полученных из сплавов с составами 10–30–60% и 60–30–10%, были равны +28 и –64%. Флуктуации потока флуоресценции вторичной мишени δ_M , содержащей ванадий, при возбуждении её излучением покрытий оказались равными +4 и –6%. Статистическая погрешность измерений не превышала 1%.

Неполное соответствие теоретических и экспериментальных данных обусловлено невозможностью исходных составов в плёнках покрытий при термовакуумном напылении, а также влиянием рас-

сеянного от стеклянной подложки излучения. Однако результаты свидетельствуют о значительном уменьшении флуктуаций потока флуоресценции вторичной мишени в сравнении с флуктуациями потока флуоресценции покрытия при изменении его состава.

При контроле толщины покрытий, содержащих элементы с малым атомным номером ($Z < 26$), использование вторичной мишени не представляется возможным вследствие трудностей, связанных с регистрацией низкоэнергетического излучения мишени, и влияния параметров окружающей среды на величину потока этого излучения. В этом случае измерение толщины сложного покрытия следует проводить по рассеянному излучению или по характеристическому излучению основы.

Минимально обнаруживаемое с вероятностью 0,95 при регистрации излучений с погрешностью не более $\pm 1\%$ изменение толщины покрытия, когда содержание элемента с большим атомным номером в трёхкомпонентном покрытии изменяется на 10%, составляет 1,5%. В качестве градуировочных зависимостей в толщиномере использованы зависимости интенсивности флуоресцентного излучения покрытия, элемента подложки или рассеянного от подложки излучения для покрытий с составом 10–30–60%, что соответствует максимальной погрешности измерения толщины, обусловленной изменением состава.

Измерять покрытия Cr–Fe–Ni по суммарному потоку характеристического излучения элементов можно с удовлетворительной точностью лишь в области малой толщины (до 5 мкм). Если покрытие расположено на материале с малым альбедо, то измерение его толщины возможно по характеристическому излучению элемента основы, отличающемуся по энергии от излучения покрытия, например вольфрама в случае основы из легированных сталей. Использование характеристического излучения вольфрама с энергией 11,1 кэВ позволяет расширить диапазон измерения Cr–Fe–Ni-покрытия до 20 мкм. В области толщины более 5 мкм значительно меньшую погрешность обеспечивает способ измерения, основанный на определении толщины покрытия по произведению суммарного потока характеристического излучения элементов покрытия и потока характеристического излучения вольфрама. Относительное содержание этого элемента в основе может колебаться в широких пределах, поэтому необходимо проводить дополнительные измерения величины потока его характеристического излучения на основах без покрытия. Если покрытие Cr–Fe–Ni расположено на лёгких подложках (например, полимерных или керамических), то измерение его толщины по величине рассеянного подложкой излучения рентгеновской трубки с серебряным анодом и напряжением 25–30 кВ возможно в диапазоне 20–200 мкм с относительной погрешностью не более 3% при колебании относительного содержания элементов в покрытии $\pm 10\%$.

Если используется покрытие Ni–Cu–Ga, измерять толщину по рассеянному подложкой излучению или по произведению суммарного потока характеристического излучения на поток рассеянного подложкой излучения при облучении первичным потоком рентгеновской трубки с серебряным анодом лучше при толщине более 20 мкм. При меньшей толщине покрытия необходимо использовать вторичную мишень.

Наименьшее влияние состава покрытия на результат измерения его толщины по произведению суммарного потока характеристического излучения на поток рассеянного лёгкой основой излучения достигается при напряжении на рентгеновском излучателе, в 2–3 раза превышающем энергию края поглощения элементов покрытия, так как при этом достигается наименьшая разность массовых коэффициентов ослабления для характеристического и рассеянного излучений.

Если покрытие расположено на лёгкой основе и состоит из элементов с высоким атомным номером ($Z > 40–50$), а измерение его толщины производится по величине потока обратнорассеянного излучения, то напряжение на излучателе устанавливают несколько меньше энергии k -края поглощения элемента покрытия с наименьшим атомным номером. При этом диапазон контролируемой толщины практически не уменьшается, а отсутствие в отражённом потоке характеристического излучения k -серии элементов покрытия позволяет использовать для регистрации рассеянного излучения детекторы с низким энергетическим разрешением.

Для измерения толщины покрытий сложного состава авторы работы [10] использовали явление дифракции рентгеновских лучей, возникающее при рассеянии рентгеновского излучения кристаллическими веществами [11, 12]. Так как в присутствии покрытия на кристаллической подложке происходит смещение дифракционного максимума от его положения, измеренного для чистой подложки, то величина этого смещения использовалась для определения толщины покрытия. Измерения, проведённые на легированной алюминием стали, на которую наносились покрытия из меди и цинка в различной комбинации, показали независимость результатов от состава покрытий. При этом погрешность измерений в диапазоне 2,5–70 мкм составляла $\pm 0,5$ мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лохманов П. Г., Скобло Ю. А., Тимофеев В. Б. Переносной отражательный гамма-толщиномер ТОР-3 // Вопросы атомной науки и техники. Сер. радиационная техника. – М.: Атомиздат, 1976. – Вып. 13. – С. 120–124.
2. Лохманов П. Г., Скобло Ю. А. Измерение толщины материалов с малым альбедо с помощью отражательных гамма-толщиномеров // Там же, 1981. – Вып. 22. – С. 76–79.
3. Румянцев С. В. Радиационная дефектоскопия. 2-е изд. М.: Атомиздат, 1974.
4. Грошев В. Я., Забродский В. А., Еремеев Ю. И. и др. Рентгеновский измеритель толщины РЕИТ-С // Приборы и техника эксперимента. – 1986. – №5. – С. 248.
5. Либхавски Х. А., Пфейфер Г. Г., Уинслоу Э. Г., Земани П. Д. Применение поглощения и испускания рентгеновских лучей. – М.: Metallurgiya, 1964.
6. Капранов Б. И., Мякинкова Л. В., Шаверин В. А. Радиоизотопная альbedo-толщинометрия полимерных покрытий на металлической основе // Дефектоскопия. – 1986. – №4. – С. 10–15.
7. Калинин Ю. С., Машин Н. И., Николаев И. И. Определение толщины медноникелевых плёнок на стали методом рентгеноспектрального анализа // Поверхность. Физика, химия, механика. – 1985. – №7. – С. 84–86.
8. Забродский В. А., Сидуленко О. А. Контроль толщины покрытий переменного состава // Заводская лаборатория. – 1984. – №2. – С. 47–50.
9. А.с. 1160239 СССР, МКИ 01В 15/02. / Рентгеновский способ измерения толщины покрытия / Забродский В. А., Сидуленко О. А. Опубликовано в Б.И., 1985, №21.
10. Иверонова В. И., Ревкевич Г. Г. Теория рассеяния рентгеновских лучей. – М.: МГУ, 1972.
11. Русаков А. А. Рентгенография металлов: Учебник для вузов. – М.: Атомиздат, 1977.
12. Сидуленко О. А. Вклад эффектов рассеяния при контроле покрытий на подложках переменной толщины // Дефектоскопия. – 1984. – №7. – С. 22–27.
13. Эглитис А. В. К вопросу об измерении толщин слоёв двухслойных покрытий // Изотопы в СССР. – 1975. – Вып. 40. – С. 7–11.
14. Roebiger V. Quantitiv Analysis of Multicomponent Surface Layers Means of XRF // Isotopenpraxis. – 1985. – Vol. 21. – №12. – P. 417–423.
15. Fluoriscient X-ray Coating Thickness Gauge SFT/157. Техническое описание фирмы Seiko Instruments & Electronics, LTD.

УДК 620.179:371.29

Б. И. КАПРАНОВ, В. К. КУЛЕШОВ, Ю. И. СЕРТАКОВ, И. И. ТОЛМАЧЕВ, В. Л. ЧАХЛОВ, В. Ф. ШУМИХИН

**ПОДГОТОВКА И АТТЕСТАЦИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО НЕРАЗРУШАЮЩЕМУ КОНТРОЛЮ
В ТОМСКОМ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

Представлен опыт работы, пути развития Аттестационного регионального центра НИИ интроскопии по неразрушающему контролю (НК), его структура, состоящая в основе из НИИ интроскопии и кафедры "Физические методы и приборы контроля качества" Томского политехнического университета и возникающие проблемы по его организации. Наличие учебно-научно-методической базы на основе НИИ интроскопии и специальности 190200 ТПУ является уникальным свойством центра и позволяет проводить обучение и аттестацию на современном уровне.

Нормативное и лицензионное обеспечение

Аттестационный региональный центр специалистов по неразрушающему контролю (НК) НИИ интроскопии при Томском политехническом университете создан в соответствии с требованиями Госгортехнадзора России и Национального аттестационного комитета по неразрушающему контролю (НАК НК) России [1]. В основе подготовки и аттестации лежит принятая в мировой практике трехуровневая система квалификации. В соответствии с лицензией Госгортехнадзора России № 12К-2001/4798 [2] от 28.08. 1996 г. центру предоставлено право осуществлять деятельность по обучению и аттестации специалистов НК 1-го и 2-го уровней квалификации по акустическому, радиационному, магнитному, вихретоковому и капиллярному методам контроля объектов котлонадзора и подъемных сооружений, магистральных нефтегазопроводов, внутренних и наружных газопроводов, машин и аппаратов потенциально опасных производств химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей промышленности, технологических трубопроводов, промышленных трубопроводов, оборуования нефтяной и газовой промышленности на территории Российской Федерации. Взаимодействие между Аттестационным региональным центром специалистов НК НИИ интроскопии и НАК НК строится на основе лицензионного соглашения, в рамках которого лицензиатор обеспечивает типовыми программами аттестации специалистов на 1-й и 2-й уровень квалификации, рекомендуемыми сборниками вопросов по общему, специальному и практическому экзаменам, нормативными документами и методической литературой, необходимой для обеспечения деятельности Аттестационного регионального центра. В настоящее время НАК НК включен в состав Государственного комитета РФ по