

П. Е. Голубков

**АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ
ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОЕВ
ПРИ УПРАВЛЯЕМОМ СИНТЕЗЕ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ
МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ**

P. E. Golubkov

**ANALYSIS OF THE APPLICABILITY OF THICKNESS
MEASUREMENT METHODS DIELECTRIC LAYERS
IN CONTROLLED SYNTHESIS PROTECTIVE COATINGS
BY MICRO-ARC METHOD OXYGENATING**

Аннотация. Актуальность и цели. Объектом исследования являются методы измерения толщины оксидных покрытий на металлических неферромагнитных подложках. Предметом исследования являются сущность и метрологические характеристики (диапазон измерения, погрешности) существующих методов измерения толщины оксидных покрытий на металлических неферромагнитных подложках. Целью работы является выбор метода измерения толщины оксидных слоев для непрерывного измерения и контроля толщины защитных покрытий, полученных микродуговым оксидированием (МДО), в процессе их управляемого синтеза. **Материалы и методы.** Для достижения поставленной цели используется системный подход для рассмотрения и анализа существующих методов измерения толщины оксидных покрытий и их метрологических характеристик. **Результаты.** Проведен аналитический обзор методов измерения толщины оксидных покрытий на металлических подложках, позволяющий определить наиболее приемлемый метод измерения толщины, удовлетворяющий предъявленным требованиям и учитывающий специфику процесса микродугового оксидирования. **Выводы.** Проведенный аналитический обзор позволяет заключить, что наиболее подходящими для измерения толщины оксидных покрытий в процессе микродугового оксидирования являются электрические методы, в частности, метод, использующий частотный интегрирующий развертывающий преобразователь (ЧИРП). Данный метод дает возможность с высокой точностью осуществлять непрерывные измерения толщины оксидных слоев непосредственно в процессе их формирования и может быть использован при разработке интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий.

Abstract. Background. The object of the study is methods for measuring the thickness of oxide coatings on metal non-ferromagnetic substrates. The subject of the study is the essence and metrological characteristics (measurement range, errors) of existing methods for measuring the thickness of oxide coatings on metal non-ferromagnetic substrates. The purpose of this work is to select a method for measuring the thickness of oxide layers for continuous measurement and control of the thickness of protective coatings obtained by micro-arc oxidation (MAO) during their controlled synthesis. **Materials and methods.** To achieve this goal, a systematic approach is used to review and analyze existing methods for measuring the thickness of oxide coatings and their metrological characteristics. **Results.** An analytical review of methods for measuring

the thickness of oxide coatings on metal substrates is carried out, which allows us to determine the most appropriate method for measuring the thickness that meets the requirements and takes into account the specificity of the micro-arc oxidation process. **Conclusions.** The analytical review allows us to conclude that the most suitable methods for measuring the oxide coatings thickness in the process of micro-arc oxidation are electrical methods, in particular, the method using a frequency integrating scanning converter (FISC). This method makes it possible to carry out continuous measurements of the thickness of oxide layers directly in the process of their forming with high accuracy and can be used in the development of an intelligent automated system for the controlled synthesis of MAO coatings.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, методы измерения толщины, диапазон измерения, погрешность, автоматизированный управляемый синтез.

Keywords: micro-arc oxidation, thickness measurement methods, measurement range, error, automated controlled synthesis.

Введение

В настоящее время оксидные покрытия со специальными свойствами (высокая микротвердость, износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость и т.д.), полученные методом микродугового оксидирования (МДО), востребованы во многих отраслях промышленности и народного хозяйства [1–4]. Появляются новые применения этих покрытий, такие как чувствительные к радиоактивному излучению слои и антибактериальные биосовместимые покрытия для костных имплантов и т.п. [5, 6]. В России и мире существуют уже порядка 10 компаний, применяющих данную технологию, однако ее широкое внедрение в промышленность в настоящее время все еще затруднено, поскольку большое количество одновременно влияющих разнородных факторов создают препятствие для эффективного управления процессом МДО и его автоматизации [7–9]. Тем не менее учеными и инженерами ведется непрерывная работа по устранению этого недостатка и совершенствованию технологического оборудования [10–13], для чего в последнее время все чаще применяются интеллектуальные алгоритмы [14, 15]. Так, в работах [16–18] предложена концепция построения интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза МДО-покрытий, в основе которой лежит использование интеллектуального алгоритма, позволяющего по измеренным в реальном времени значениям технологических параметров и свойств оксидных покрытий контролировать и корректировать их отклонение от заданных значений, в связи с чем возникает необходимость разработки соответствующих средств измерения. В данной работе проведен аналитический обзор методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке с целью выбора наиболее подходящего из них для разработки измерительного преобразователя толщины МДО-покрытий интеллектуальной автоматизированной системы управляемого синтеза.

Аналитический обзор методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке

Покрытия, получаемые микродуговым оксидированием, представляют собой слой оксида металла основы (алюминий, титан, магний и другие вентильные металлы) на подложке из этого металла. Рассмотрим существующие методы измерения толщины таких покрытий с учетом следующих требований:

- возможность измерения в режиме реального времени;
- возможность проводить измерения толщины покрытий во время их формирования, т.е. не вынимая деталь из гальванической ячейки и не выключая источник технологического тока;
- диапазон измеряемых толщин должен составлять от 1 до 300 мкм;
- погрешность измерения толщины должна составлять не более 1 %.

Существуют несколько методов измерения толщины диэлектрических покрытий на металлической подложке:

- вихретоковый метод;
- термографический метод;
- радиометрический метод β -отражения;

- ультразвуковые методы: эхо-импульсный и резонансный;
- оптические методы: поляризационный; интерференционный; колориметрический; метод светового сечения; метод теневого сечения;
- электрические методы: зондовые методы; емкостной метод; методы измерения толщины, использующие измерительные мосты и делители напряжения.

1. Вихретоковый метод измерения толщины (рис. 1) основан на взаимодействии материала покрытия с токами высокой частоты (вихревыми токами). Исследуемый образец помещают под катушку индуктивности, питаемую переменным током. При этом в металле основы наводятся вихревые токи, которые посредством электромагнитной индукции влияют на первичный ток катушки. Это изменение первичного тока зависит от электрических и магнитных свойств материала основы и покрытия, а также от их геометрических размеров, в частности, толщины. Данный метод позволяет определять толщину диэлектрических покрытий на ферромагнитной проводящей подложке в диапазоне от 0 до 500 мкм.

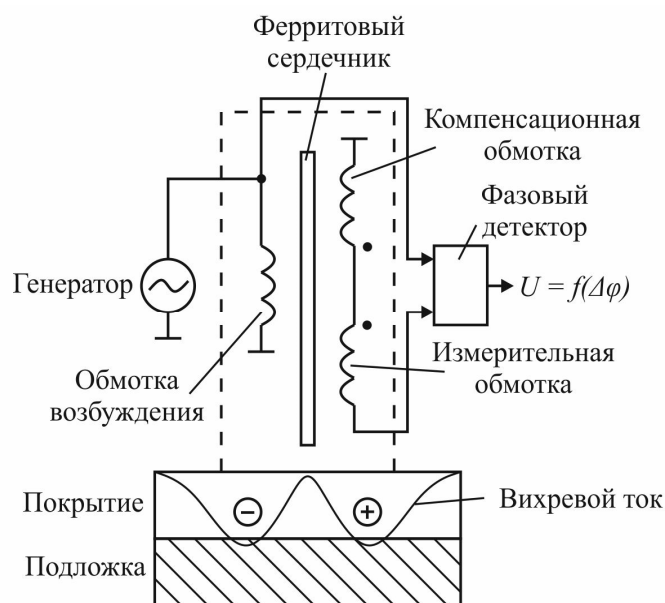


Рис. 1. Структурная схема вихретокового измерительного преобразователя толщины покрытий

Основная погрешность вихретоковых толщиномеров составляет 3 %. Данный метод применяется для исследования готовых образцов с МДО-покрытиями, но он непригоден для измерения толщины этих покрытий в процессе их формирования, так как позволяет осуществлять только дискретные измерения.

2. Термографический метод определения толщины (рис. 2) основан на измерении параметров тепловых полей исследуемых образцов.

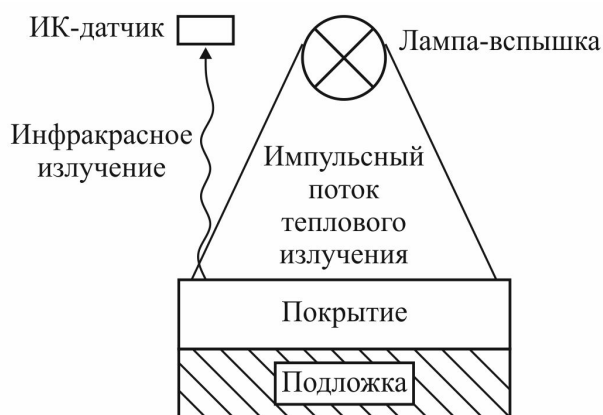


Рис. 2. Принцип измерения толщины покрытий термографическим методом

Образец с покрытием подвергается импульсному нагреву с помощью мощной лампы-вспышки. Поглощенная образцом энергия преобразуется в тепловое излучение, которое детектируется ИК-датчиком. Путем сравнения интенсивностей ИК-излучения от подложки и от образца с покрытием получают интенсивность теплового излучения покрытия, которая зависит от его геометрических параметров, в том числе толщины.

Диапазон измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических подложках составляет от нескольких микрометров до 1 мм. Недостатком метода является зависимость результата измерений от теплофизических (теплопроводность, плотность, отражающая способность и др.) и геометрических (шероховатость поверхности) параметров покрытия, а также от адгезии покрытия к подложке. Метод неприменим для измерений в процессе МДО, поскольку вспышки микроразрядов в покрытии сами являются источником тепла, разогревающего как электролит, так и оксидный слой, что приводит к увеличению погрешности.

Радиометрический метод β -отражения (метод обратного рассеяния). Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего данный метод, представлена на рис. 3.

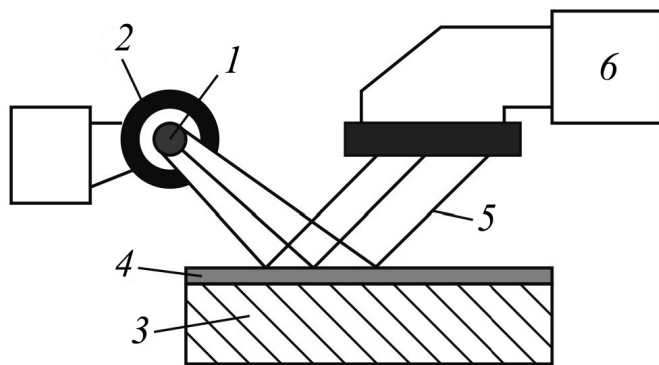


Рис. 3. Структурная схема измерительного преобразователя

Источник β -излучения 1 (радиоактивный изотоп) через отверстие в камере 2 облучает образец 3 с покрытием 4, а отраженное излучение 5 фиксируется приемником 6 (счетчиком Гейгера). При этом доля частиц, отраженных под углом 180° (интенсивность обратного рассеяния), используется в качестве меры толщины покрытия. При постоянной геометрии датчиков и использовании одного и того же источника излучения интенсивность обратного рассеяния I_{obr} зависит от порядкового номера вещества в таблице Менделеева и толщины рассеивающего слоя d_s :

$$I_{obr} = I_n (1 - \exp(-m_r d_s)), \quad (1)$$

где I_n – интенсивность насыщения (интенсивность падающего пучка частиц), m_r – коэффициент обратного рассеяния.

Радиометрический метод позволяет измерять толщину как металлических, так и диэлектрических покрытий на металлических и диэлектрических подложках в диапазоне от сотых долей до сотен микрометров. Мешающими параметрами для измерения толщины данным методом являются плотность и атомный номер материалов покрытия и подложки, шероховатость их поверхности, но самым главным недостатком данного метода является использование радиоактивных изотопов, что представляет опасность для человека [19].

Ультразвуковые методы измерения толщины основаны на использовании различных акустических эффектов, возникающих при прохождении ультразвуковых колебаний через исследуемую среду. Существуют два акустических метода: эхо-импульсный и резонансный. В первом из них источник ультразвуковых колебаний посылает импульс на контролируемую поверхность, а сигнал, отраженный от границы раздела «покрытие – подложка», регистрируется приемником. Толщина покрытия определяется по времени прохождения ультразвуковой волны в покрытии до границы с материалом основы, имеющим другие упругие свойства. Резонансный метод основан на измерении свободных колебаний (резонанса) в образце и использовании интерференции звуковых волн.

Диапазон измерения толщины покрытий ультразвуковыми толщиномерами – от 100 мкм и выше. Неоспоримым преимуществом данных приборов является возможность измерения толщины покрытий в труднодоступных местах или в изделиях замкнутого типа (трубы, сосуды), однако в гальваническом производстве данный метод не нашел широкого применения в связи с большим значением минимальной измеряемой толщины покрытия. Основная погрешность ультразвуковых методов измерения толщины составляет 1–2 %, большой вклад в которую вносит методическая погрешность, обусловленная различием скорости звука в разных объектах и погрешность нелинейности.

Оптические методы. К ним относятся: поляризационный (эллипсометрический) метод, интерференционные методы, методы светового и теневого сечения.

Поляризационный метод измерения толщины. Для исследования анодных оксидных слоев применяются методы отражательной эллипсометрии. При этом падающий линейно-поляризованный свет отражается от поверхности образца; отраженный луч, имеющий эллиптическую поляризацию, фиксируется приемником излучения (рис. 4).

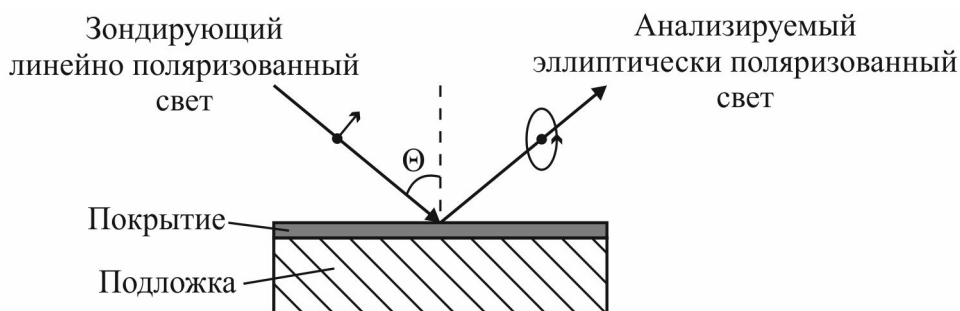


Рис. 4. Принцип измерения толщины покрытия эллипсометрическим методом

Изменение параметров эллипса поляризации при отражении характеризуется коэффициентами Френеля R_p и R_s и эллипсометрическими углами (параметрами) Δ и Ψ , связанными между собой основным уравнением эллипсометрии

$$\rho = \frac{R_p}{R_s} = \operatorname{tg} \Psi \cdot e^{i\Delta}, \quad (2)$$

где ρ – относительный коэффициент отражения поляризованного излучения.

Величины Ψ и Δ зависят от характеристик отражающей поверхности и измеряются с помощью эллипсометров. Если на поверхности образца имеется пленка, то его эллипсометрические параметры изменяются, что связано с многократным отражением света на границах разделов пленка – внешняя среда и пленка – подложка и последующей интерференцией отраженных лучей.

Методом эллипсометрии в видимой области проводятся измерения толщин слоя с погрешностью (3–5) % в диапазоне толщин от 10 до 1000 нм и 0,5 % в диапазоне толщин от 1 до 10 нм. Описанные погрешности являются инструментальными и связаны с погрешностью измерения азимутальных углов и несовершенством оптических элементов эллипсометра.

Эллипсометрический метод измерения используется для определения тонких оксидных слоев, вследствие чего оказывается неприменимым для МДО-покрытий, поскольку их толщина составляет до 300 мкм.

Интерференционный метод основан на явлении интерференции лучей, отраженных от внешней и внутренней границ покрытия (рис. 5). При этом толщину покрытия d можно найти по выражению

$$d = \frac{\beta \lambda}{2\pi \sqrt{N_1^2 - \sin^2(\varphi_0)}}, \quad (3)$$

где β – сдвиг фаз; λ – длина волны в вакууме; N_1 – комплексный показатель преломления оксидной пленки; φ_0 – угол падения лучей. Данный метод позволяет определять толщину пленки с точностью до 0,1 нм [20].

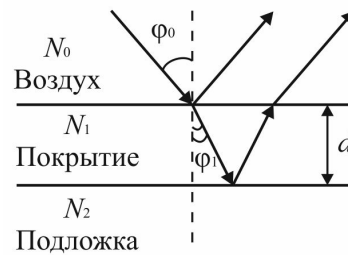


Рис. 5. Ход лучей в образце

Существует две разновидности интерференционного метода измерения толщины. Для первой из них требуется наличие микрорельефа (ступеньки) на поверхности детали. При попадании луча на ступеньку интерференционная картина искажается и происходит смещение интерференционных полос, по которому можно определить высоту ступеньки (рис. 6,а). При работе в белом свете искривление в одну интерференционную полосу соответствует высоте неровности на исследуемой поверхности, равной 0,27 мкм. Для измерения толщины данным методом используются микроинтерферометры (рис. 6,б).

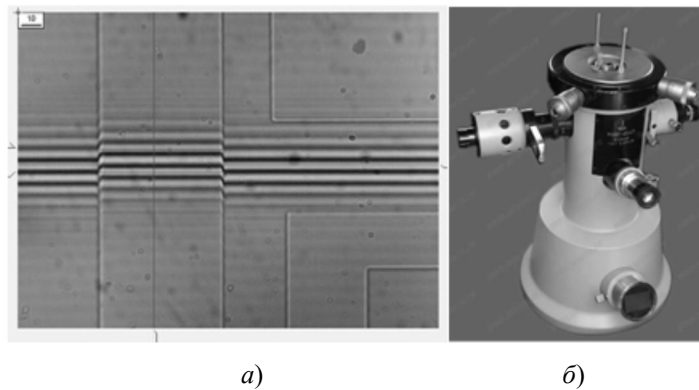


Рис. 6. Интерференционный метод измерения толщины:
 а – искажение интерференционной картины на неровностях поверхности; б – микроинтерферометр

Диапазон измерения толщины данным методом составляет 0,03 до 2,2 мкм.

Вторая разновидность – колориметрический метод – основана на явлении изменения цвета при интерференции лучей, отраженных от внешней и внутренней поверхности покрытия. Толщину покрытия при измерениях данным методом определяют с помощью специальных таблиц. Недостатком метода является большая субъективная погрешность (до 90 %), а также малая толщина измеряемых пленок.

Метод светового сечения. Свет от источника излучения проходит через узкую прямоугольную щель, изображение которой попадает на образец под некоторым углом α . Направление падения (1) и отражения света от поверхностей детали (2а) и покрытия (2б) показаны на рис. 7. В поле зрения микроскопа по оси 2а и 2б оказываются два изображения щели, отраженные от плоскостей АА и ББ и смещенные относительно друг друга на расстояние b , пропорциональное толщине покрытия (рис. 8).

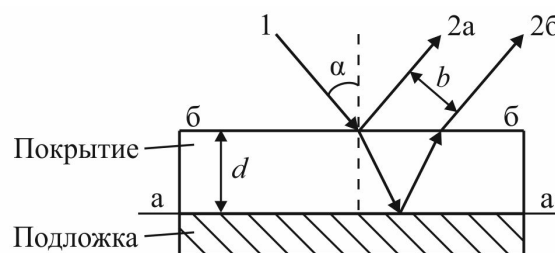


Рис. 7. Принцип измерения толщины прозрачного покрытия методом светового сечения

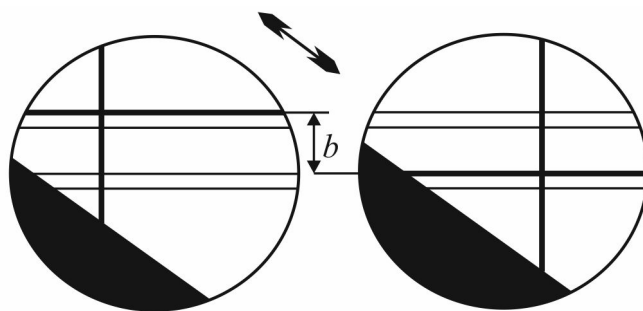


Рис. 8. Вид поля зрения микроскопа при измерении толщины покрытия методом светового сечения:
 b – расстояние между изображениями щели

Далее с помощью окуляр-микрометра измеряются величины b последовательным наведением перекрестия окуляр-микрометра на наиболее четкие края изображения щели и производится отсчет показаний в этих точках, после чего находится их разность. Для прозрачного покрытия толщину h можно вычислить по формуле

$$h = \frac{b}{V_{ob} \sqrt{2}} \cdot \sqrt{2n-1}, \quad (4)$$

где V_{ob} – увеличение объектива микроскопа; n – показатель преломления пленки.

Диапазон толщин покрытий, измеряемых данным методом, составляет от 0,8 до 720 мкм. Метод позволяет проводить только дискретные измерения.

Метод теневого сечения является модификацией метода светового сечения и отличается от него тем, что оператор наблюдает не освещенное изображение щели, а тень от этого изображения. При этом на поверхности образца обязательно должна быть ступенька, по высоте равная толщине покрытия. Для получения тени на высоте 0,1 мм над опорной плоскостью располагают нож. Пучок лучей, прошедший через щель, встречает на своем пути нож, который срезает часть пучка; оставшаяся часть пучка падает на поверхность образца под углом 45° (рис. 9,а).

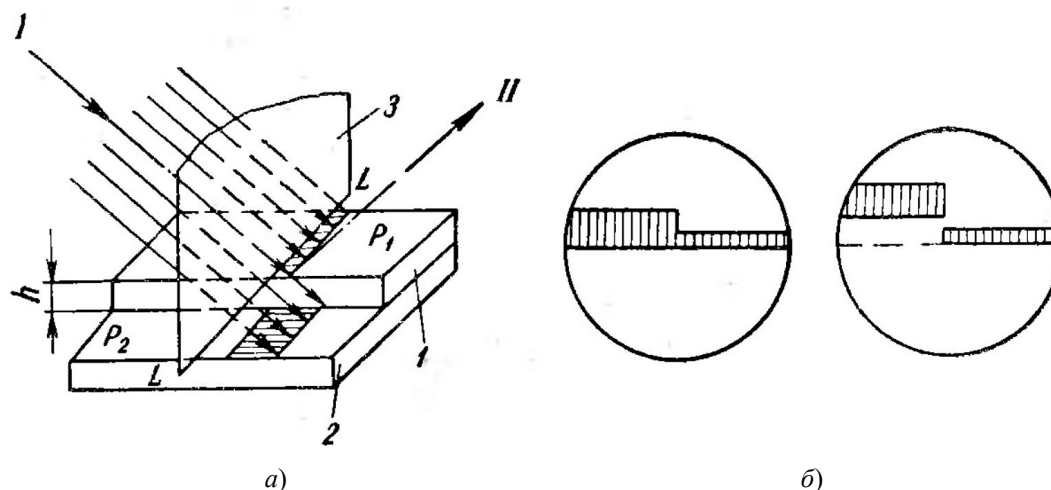


Рис. 9. Метод теневого сечения:
 а – принцип измерения; б – вид поля зрения микроскопа

В поле зрения микроскопа при этом будет виден смещенный край щели по отношению к кромке ножа (рис. 9,б). Расстояние между изображениями проекций лезвия ножа на обеих частях уступа является мерой толщины покрытия (высоты уступа).

Диапазон толщин покрытия, измеряемых методом теневого сечения, – от 40 до 320 мкм. Недостатком данного метода является необходимость формирования ступеньки на поверхности образца и, как и у предыдущего метода, невозможность непрерывного измерения.

Электрические методы измерения толщины. Основными физическими величинами, пригодными для измерения толщины покрытий электрическими методами, являются сопротивление, емкость и резонансная частота.

Одним из возможных вариантов измерения толщины покрытия по сопротивлению образца с покрытием является четырехзондовый метод. К поверхности образца подводятся четыре зонда – два токовых и два потенциальных. Через токовые зонды пропускается электрический ток I , а падение напряжения на образце U измеряется между потенциальными зондами. Толщина покрытия d при этом рассчитывается по формуле

$$d = \frac{\rho I}{U}, \quad (5)$$

где ρ – удельное объемное сопротивление покрытия.

Суммарная погрешность измерения толщины оксидных пленок на алюминии четырехзондовым методом составляет $\pm 15\%$. Данный метод позволяет проводить только дискретные измерения, что является его недостатком.

При измерении толщины емкостным методом используется зависимость резонансной частоты колебательного контура от емкости конденсатора. Конденсатор, состоящий из образца (металлическая подложка с исследуемым покрытием) и измерительного электрода, включается в колебательный контур с катушкой индуктивности, на вход которого подключается генератор сигналов переменного тока, а на выход – частотомер для измерения резонансной частоты (рис. 10). Толщина покрытия d при этом пропорциональна квадрату резонансной частоты колебательного контура

$$d = 4\pi^2 L \varepsilon \varepsilon_0 S f_0^2, \quad (6)$$

где L – индуктивность катушки; ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика; ε_0 – диэлектрическая постоянная; S – площадь обкладок конденсатора; f_0 – резонансная частота.

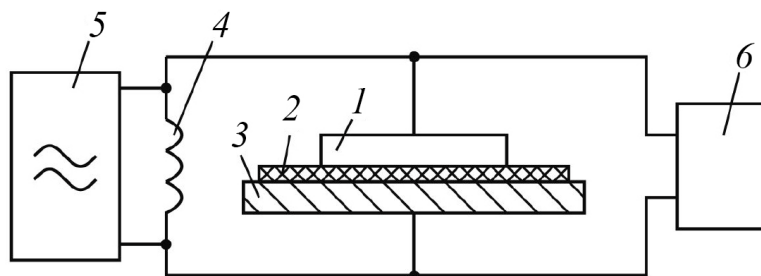


Рис. 10. Устройство для измерения толщины покрытий емкостным методом: 1 – измерительный электрод; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – металлическая подложка; 4 – катушка индуктивности; 5 – генератор сигналов; 6 – частотомер

Также для измерения толщины применяются измерительные мосты и делители напряжения. Измерение толщины мостовым методом осуществляется путем уравнивания измерительного моста, далее из условия равновесия выражается неизвестное комплексное сопротивление, из которого выражается толщина диэлектрика d .

Одним из вариантов электрических методов измерения толщины покрытий, использующих конденсаторный делитель напряжения, является метод частотного интегрирующего развертывающего преобразователя (ЧИРП), разработанный специально для процесса МДО [21]. Структура измерительного канала толщины покрытия данным методом представлена на рис. 11.

Металлический образец с оксидным покрытием и измерительный электрод, расположенный на расстоянии d от него, образуют исследуемый конденсатор, который служит нижним плечом делителя. Верхним плечом делителя служит образцовый конденсатор C_0 с известной емкостью. Делитель подключен к частотному интегрирующему развертывающему преобразователю, который служит для преобразования емкости в частоту согласно выражению

$$f_{out} = \frac{1}{4R_0C_d} + \left(\frac{C_{eq} - C_0}{C_0 + C_{eq}} \right) \cdot \frac{1}{4R_iC_d} = f_0 + \Delta f, \quad (7)$$

где C_{eq} – емкость исследуемого конденсатора, C_d, R_0, R_i – параметры компонентов интегральной схемы ЧИРП, f_0 – начальная частота, Δf – девиация частоты (если $C_{eq} < C_0$, f_{out} уменьшается, а когда $C_{eq} > C_0$ – увеличивается) (рис. 12).

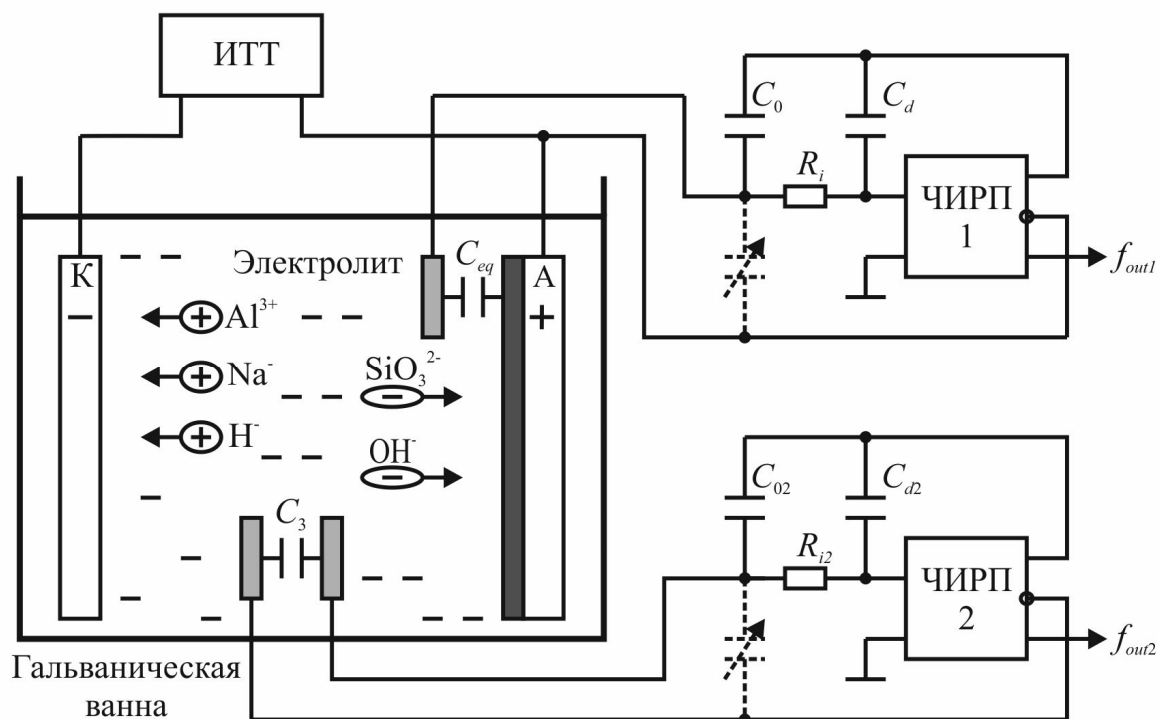


Рис. 11. Структура измерительного канала толщины МДО-покрытия: ИТТ – источник технологического тока; А – анод; К – катод; ЧИРП – частотный интегрирующий развертывающий преобразователь

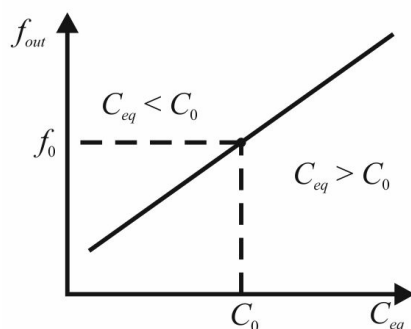


Рис. 12. Зависимость частоты выходных импульсов ЧИРП от емкости исследуемого образца C_{eq}

Толщина покрытия d_1 рассчитывается по следующей формуле:

$$d_1 = \left(\frac{1}{C_{eq}} - \frac{1}{C_3} \right) \cdot \frac{1}{S_{dc}}, \quad (8)$$

где S_{dc} – чувствительность первичного преобразователя (исследуемый конденсатор); C_3 – емкость конденсатора с электролитом в качестве диэлектрика и имеющего такие же геометрические параметры, как и исследуемый конденсатор. Емкость C_3 измеряется в процессе МДО с помощью второго модуля ЧИРП.

Диапазон измерения толщины данным методом составляет от 0 до 300 мкм, а погрешность не превышает 1%. Неоспоримым достоинством данного метода является возможность непрерывного измерения толщины покрытия непосредственно во время МДО-обработки.

Заключение

В настоящее время существует большое количество методов измерения толщины диэлектрических пленок на металлических подложках, однако по разным причинам не все из них удовлетворяют предъявляемым для процесса микродугового оксидирования требованиям. Наиболее приемлемыми для использования в интеллектуальной автоматизированной системе управляемого синтеза МДО-покрытий представляются электрические методы, например, емкостной метод и особенно метод ЧИРП, учитывающий специфику процесса МДО. Применение данного метода позволит не только получить наиболее точные и достоверные зависимости толщины оксидных слоев от технологических параметров, но и обеспечить ее непрерывный контроль в течение всей МДО-обработки.

Библиографический список

1. *Казанцев, И. А.* Технология получения композиционных материалов микродуговым оксидированием : монография / И. А. Казанцев, А. О. Кривенков. – Пенза : ИИЦ ПГУ, 2007. – 240 с.
2. Improving wear and corrosion properties of alumina coating on AA7075 aluminum by plasma electrolytic oxidation: Effects of graphite absorption / В. Haghghat-Shishavan, R. Azari-Khosrowshahi, S. Haghghat-Shishavan, M. Nazarian-Samani, N. Parvini-Ahmadi // *Applied Surface Science*. – 2019. – Vol. 481. – P. 108–119.
3. Применение в изделиях медицинской техники покрытий, полученных методом микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, К. Ю. Крайнова, М. И. Сафронов, Е. А. Печерская, А. М. Бибарсова // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2019) : материалы VI Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (13 марта 2019 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2019. – С. 184–186.
4. *Шаркеев, Ю. П.* Биоконпозиты на основе кальцийфосфатных покрытий, наноструктурных и ультрамелкозернистых биоинертных металлов, их биосовместимость и биодegradация / Ю. П. Шаркеев, С. Г. Псахье, Е. В. Легостаева ; отв. ред. Н. З. Ляхов. – Томск : Издательский Дом Томского государственного университета, 2014. – 596 с.
5. One-Step Synthesis of Antibacterial Coatings by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum / J. S. Santos, A. Rodrigues, A. P. Simon, C. H. Ferreira, V. A. Q. Santos, M. S. Sikora, N. C. Cruz, G. P. Mambri, F. Trivinho-Strixino // *Advanced Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 21. – P. 1–6, 1900119.
6. Thermostimulated luminescence of plasma electrolytic oxidation coatings on 6082 aluminium surface / A. Zolotarjovs, K. Smits, K. Laganovska, I. Bite, L. Grigorjeva, K. Auzins, D. Millers, L. Skuja // *Radiation Measurements*. – 2019. – Vol. 124. – P. 29–34.
7. *Михеев, А. Е.* Разработка функциональной схемы влияния основных факторов процесса микродугового оксидирования на свойства покрытий / А. Е. Михеев, Т. В. Трушкина, А. В. Гирн, Д. В. Раводина // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени акад. М. Ф. Решетнева. – 2015. – № 16 (2). – С. 464–469.
8. Взаимосвязи технологических параметров процесса микродугового оксидирования и свойств оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // Технологии микро- и нанoeлектроники в микро- и наносистемной технике : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (20–22 февраля 2019 г.). – Москва, 2019. – С. 140–143.
9. Исследование влияния технологических параметров процесса микродугового оксидирования на свойства оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, М. И. Сафронов, А. В. Печерский // Известия вузов. Электроника. – 2019. – Т. 24, № 4. – С. 363–369.
10. *Borikov, V. N.* Virtual measurement system of electric parameters of microplasma processes / V. N. Borikov, P. F. Baranov, A. D. Bezshlyakh // *SIBCON-2009: Proc.* – 2009. – P. 275–279.
11. *Bolshenko, A. V.* Power Supplies for Microarc Oxidation Devices / A. V. Bolshenko, A. V. Pavlenko, V. S. Puzin, I. N. Panenko // *Life Science Journal*. – 2014. – Vol. 11 (1s). – P. 263–268.
12. *Мамаев, А. И.* Формирование наноструктурных неметаллических неорганических покрытий путем локализации высокоэнергетических потоков на границе раздела фаз : учеб. пособие / А. И. Мамаев, В. А. Мамаева, В. Н. Бориков, Т. И. Дорофеева. – Томск : Изд-во Томск. ун-та, 2010. – 360 с.
13. *Голубков, П. Е.* Методы измерения температуры в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, А. В. Мартынов, Е. А. Печерская // Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы (ВМНПК – 2018) : сб. науч. ст. V Всерос. межвуз. науч.-практ. конф. (14 марта 2018 г.). – Пенза : Изд-во ПГУ, 2018. – С. 245–248.
14. *Borikov, V.* Neural method alloys identification by the microplasma oxidation process in the electrolyte solutions / V. Borikov // *Materialwiss. Werkstofftech.* – 2006. – Vol. 37. – P. 915–918.
15. Реализация поддержки принятия решений в управлении процессом микродугового оксидирования на базе искусственных нейронных сетей / В. В. Ломакин, Т. В. Зайцева, Н. П. Путивцева,

- В. М. Яценко, О. П. Пусная // Научные ведомости. Сер.: Экономика. Информатика. – 2016. – Вып. 40, № 23 (244). – С. 124–133.
16. Автоматизированная исследовательская технологическая установка микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, О. В. Карпанин, Ю. В. Шепелева, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов // Наноструктурированные оксидные пленки и покрытия : материалы IV Междунар. молодежной науч. школы-семинара (9–12 октября 2017 г.). – Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2017. – С. 103–114.
 17. Интеллектуальная система управляемого синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Г. В. Козлов, А. В. Печерский // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2. – С. 99–108.
 18. Алгоритм функционирования интеллектуальной системы синтеза оксидных покрытий / Е. А. Печерская, П. Е. Голубков, О. В. Карпанин, Д. В. Артамонов, А. М. Бибарсова, А. В. Лысенко // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 2. – С. 85–94.
 19. Сясько, В. А. Перспективные методы измерения толщины защитных покрытий. Проблемы методов и метрологического обеспечения / В. А. Сясько, С. С. Голубев, Н. И. Смирнова // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : МГОУ ВО «Белорусско-Российский университет», 2017. – С. 30–39.
 20. Королев, А. П. Определение толщины пленки Al₂O₃ на холодных катодах оптическим методом / А. П. Королев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2012. – Т. 18, № 3. – С. 683–687.
 21. Метод измерения толщины оксидного покрытия в процессе микродугового оксидирования / П. Е. Голубков, Е. А. Печерская, Н. В. Громков, Т. О. Зинченко, Д. В. Артамонов, И. И. Кочегаров // SCM-2019 : материалы Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2019. – Т. 1. – С. 300–303.

References

1. Kazantsev I. A., Krivenkov A. O. *Tekhnologiya polucheniya kompozitsionnykh materialov mikrodugovym oksidirovaniem: monografiya* [Technology of production of composite materials of micro-arc oxidation : monograph]. Penza: IITs PGU, 2007, 240 p. [In Russian]
2. Haghghat-Shishavan B., Azari-Khosrowshahi R., Haghghat-Shishavan S., Nazarian-Samani M., Parvini-Ahmadi N. *Applied Surface Science*. 2019, vol. 481, pp. 108–119.
3. Golubkov P. E., Kraynova K. Yu., Safronov M. I., Pecherskaya E. A., Bibarsova A. M. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2019): materialy VI Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (13 marta 2019 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (MNPK – 2019) : materials of the VI all-Russia. inter-University. scientific-practical Conf. (March 13, 2019)]. Penza: Izd-vo PGU, 2019, pp. 184–186. [In Russian]
4. Sharkeev Yu. P., Psakh'e S. G., Legostaeva E. V. *Biokompozity na osnove kal'tsiyfosfatnykh pokrytiy, nanostrukturnykh i ul'tramelkozernistykh bioinertnykh metallov, ikh biosovmestimost' i biodegradatsiya* [Biocomposites based on calcium phosphate coatings, nanostructured and ultrafine-grained bioinert metals, their biocompatibility and biodegradation]. Tomsk: Izdatel'skiy Dom Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, 2014, 596 p. [In Russian]
5. Santos J. S., Rodrigues A., Simon A. P., Ferreira C. H., Santos V. A. Q., Sikora M. S., Cruz N. C., Mambri G. P., Trivinho-Strixino F. *Advanced Engineering Materials*. 2019, vol. 21, pp. 1–6, 1900119.
6. Zolotarjovs A., Smits K., Laganovska K., Bite I., Grigorjeva L., Auzins K., Millers D., Skuja L. *Radiation Measurements*. 2019, vol. 124, pp. 29–34.
7. Mikheev A. E., Trushkina T. V., Girm A. V., Ravodina D. V. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akad. M. F. Reshetneva* [Bulletin of the Siberian state aerospace University named after akad. M. F. Reshetneva]. 2015, no. 16 (2), pp. 464–469. [In Russian]
8. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Tekhnologii mikro- i nanoelektroniki v mikro- i nanosistemnoy tekhnike: materialy 6-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (20–22 fevralya 2019 g.)* [Technologies of micro- and nanoelectronics in micro- and nanosystem engineering: materials of the 6th international conference. scientific and technical Conf. (February 20–22, 2019)]. Moscow, 2019, pp. 140–143. [In Russian]
9. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Safronov M. I., Pecherskiy A. V. *Izvestiya vuzov. Elektronika* [University news. Electronics]. 2019, vol. 24, no. 4, pp. 363–369. [In Russian]
10. Borikov V. N., Baranov P. F., Bezshlyakh A. D. *SIBCON-2009: Proc.* 2009, pp. 275–279.
11. Bolshenko A. V., Pavlenko A. V., Puzin V. S., Panenko I. N. *Life Science Journal*. 2014, vol. 11 (1s), pp. 263–268.
12. Mamaev A. I., Mamaeva V. A., Borikov V. N., Dorofeeva T. I. *Formirovanie nanostrukturnykh nemetallicheskiykh neorganicheskikh pokrytiy putem lokalizatsii vysokoenergeticheskikh potokov na granitse razdela faz: ucheb. posobie* [Formation of nanostructured non-metallic inorganic coatings by localization

- of high-energy flows at the phase interface: textbook. stipend]. Tomsk: Izd-vo Tomsk. un-ta, 2010, 360 p. [In Russian]
13. Golubkov P. E., Martynov A. V., Pecherskaya E. A. *Informatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Problemy i perspektivy (VMNPK – 2018): sb. nauch. st. V Vseros. mezhvuz. nauch.-prakt. konf. (14 marta 2018 g.)* [Information technologies in science and education. Problems and prospects (VMNPC-2018): collection of scientific articles V vseros. inter-University. scientific-practical Conf. (March 14, 2018)]. Penza: Izd-vo PGU, 2018, pp. 245–248. [In Russian]
 14. Borikov V. *Materialwiss. Werkstofftech* [Material tech]. 2006, vol. 37, pp. 915–918.
 15. Lomakin V. V., Zaytseva T. V., Putivtseva N. P., Yatsenko V. M., Pusnaya O. P. *Nauchnye vedomosti. Ser.: Ekonomika. Informatika* [Scientific Bulletin. Ser.: Economy. Computer science]. 2016, iss. 40, no. 23 (244), pp. 124–133. [In Russian]
 16. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Karpanin O. V., Shepeleva Yu. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V. *Nanostrukturirovannye oksidnye plenki i pokrytiya: materialy IV Mezhdunar. molodezhnoy nauch. shkoly-seminara (9–12 oktyabrya 2017 g.)* [Nanostructured oxide films and coatings: materials of the IV international conference. youth scientific school-seminar (October 9-12, 2017)]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2017, pp. 103–114. [In Russian]
 17. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Kozlov G. V., Pecherskiy A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 99–108. [In Russian]
 18. Pecherskaya E. A., Golubkov P. E., Karpanin O. V., Artamonov D. V., Bibarsova A. M., Lysenko A. V. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Management. Control]. 2019, no. 2, pp. 85–94. [In Russian]
 19. Syas'ko V. A., Golubev S. S., Smirnova N. I. *Sovremennye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob"ektov: materialy 6-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern methods and devices for quality control and diagnostics of objects: materials of the 6th international conference. science.- tech. conf.]. Mogilev: MGOU VO «Belorussko-Rossiyskiy universitet», 2017, pp. 30–39. [In Russian]
 20. Korolev A. P. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Tambov State Technical University]. 2012, vol. 18, no. 3, pp. 683–687. [In Russian]
 21. Golubkov P. E., Pecherskaya E. A., Gromkov N. V., Zinchenko T. O., Artamonov D. V., Kochegarov I. I. *SCM-2019: materialy Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam* [SCM-2019: materials of the international conference. Conf. by soft computing and measurement]. Saint-Petersburg: Izd-vo SPBGETU «LETI» im. V. I. Ul'yanova (Lenina), 2019, vol. 1, pp. 300–303. [In Russian]

Голубков Павел Евгеньевич

аспирант, инженер,
кафедра информационно-измерительной техники
и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: golpravpnz@yandex.ru

Golubkov Pavel Evgen'evich

postgraduate student, engineer,
sub-department of information-measuring equipment
and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Образец цитирования:

Голубков, П. Е. Анализ применимости методов измерения толщины диэлектрических слоев при управляемом синтезе защитных покрытий методом микродугового оксидирования / П. Е. Голубков // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2020. – № 1 (31). – С. 81–92. – DOI 10.21685/2307-5538-2020-1-11.