

УДК 620.1.08

Статья обзорного характера

Методы и приборы измерения толщины гальванических покрытий. Вопросы применения и обеспечения достоверности результатов измерений

Сясько В.А.

Ключевые слова: гальваническое покрытие; толщина; толщиномер; измерение; погрешность измерения

В статье рассмотрены основные методы и приборы измерения толщины гальванических покрытий всех типов. Выполнен анализ основных факторов, определяющих применимость и метрологические характеристики толщиномеров защитных металлических покрытий и достоверность результатов измерений с их использованием в условиях гальванических производств.

Methods and Devices for the Measurement of Coating Thickness. Problems Related with the Application and Reliability of the Results of Measurements

Syasko V.A.

Key words: electrodeposited coating; thickness; thickness gauge; measurement; measurement error

Electrodeposited coatings of the wide nomenclature are one of the most widespread in machine and instrument-making manufacture. Practically in all standard documents the indispensable requirement to ensure certain thickness of coatings for successful application of products, from large-sized to the miniature is put. Thus technological tolerances become tougher. In this paper physical principles and problems of application of thickness meters implementing coulometric and spherical abrasion methods are considered, principles of carrying out of measurements, questions of optimal usage are described, examples of the equipment produced by leading manufacturers and metrological characteristics are given. Also creation principles, physical bases and measurement algorithms for nondestructive electromagnetic thickness meters implement-

ing magneto - inductive, eddy current phase and frequency methods of measurement are considered, examples of produced by foreign equipment and domestic producers are given. Influence of hindering parameters (dispersion of electrical conductivity and magnetic properties of coatings and the bases, roughnesses, the sizes, etc.), and also methods of their suppression is considered. It is shown that possibility of measurement of all types of coatings is based on complex applications of the considered equipment, and reliability of results can be reached only by creation metrologically the provided measuring system of gages which are including instruments, measuring transducers, techniques of their application and reference samples a coating/base metal by manufacture, maintenance and checking.

Гальванические покрытия являются одними из наиболее распространенных в машино- и приборостроительных производствах. Их основное назначение – обеспечение антикоррозионных, декоративных, износостойких, антифрикционных и др. специальных свойств изделий из черных и цветных металлов. Одним из основных параметров качества покрытия является значение его толщины T . Практически во всех нормативных документах ставится обязательное условие гарантированного обеспечения заданного T для успешного применения изделий в условиях агрессивных сред, при трении и взаимодействии с абразивными материалами. В современных условиях ряд используемых материалов имеет все более возрастающую стоимость, поэтому ужесточение технологических допусков и снижение погрешностей измерений при гарантированном обеспечении требуемой величины T позволяет обеспечить существенную экономию материальных и финансовых ресурсов.

Анализ применимости тех или иных методов измерения толщины гальванических покрытий требует выделить параметры, характеризующие покрытия и основу. Материал покрытий характеризуется следующими основными параметрами:

- относительная магнитная проницаемость μ , безразмерная величина, характеризующая магнитные свойства;

- удельная электропроводность σ , МСм/м;

- твердость H_c или микротвердость H_v , характеризующие возможность изменения толщины покрытия в момент прижатия преобразователя к его поверхности при измерении электронными приборами или с использованием механических устройств;

- однослойное или многослойное, в предположении, что слои имеют отличающиеся μ , σ и H_c ;

- плотность ρ , кг/м³;

- шероховатость R_a , мкм, характеризующая качество поверхности, и ее разброс по поверхности изделия или от изделия к изделию в пределах контролируемой партии;

- температура t и ее градиент по поверхности покрытия изделия или от изделия к изделию в пределах контролируемой партии, т.к. это будет вызывать изменение μ , σ и H_c покрытия и изделия и, соответственно, приводить к погрешности измерений.

В свою очередь можно выделить параметры, характеризующие материал основы (изделия или конструкции):

- относительная магнитная проницаемость μ и ее разброс по поверхности изделия или от изделия к изделию в пределах контролируемой партии;

- удельная электропроводность $\sigma_{\text{осн}}$ и ее разброс по поверхности изделия или от изделия к изделию в пределах контролируемой партии (например, разброс электропроводности латунных изделий одной марки может достигать $\pm 10\%$);

- геометрические размеры изделия или зоны контроля – длина и ширина (мм x мм), для плоских изделий;

- радиус r (внутренний или наружный), мм, в зоне контроля для цилиндрических и сферических изделий;

- шероховатость R_a , мкм, характеризующая качество поверхности, и ее разброс по поверхности изделия или от изделия к изделию в пределах контролируемой партии;

- габариты: миниатюрные (размер которых меньше зоны контроля преобразователя), малогабаритные (размер которых сопоставим с зоной контроля преобразователя), среднеразмерные (для контроля которых необходимо провести несколько измерений с нормированным шагом на поверхности, не требующие создания карты контроля), крупногабаритные (характеризующиеся необходимостью проведения большого числа измерений с нормированным шагом на поверхности, требующие создания карты контроля).

На основании выделенных параметров, характеризующих покрытия и основы, можно сформулировать задачи контроля толщины гальванических покрытий и дать примеры этих задач в промышленности.

1) Ферромагнитные электропроводные покрытия на электропроводных ферромагнитных основаниях. К данной группе задач относится измерение толщины электролитического никеля на изделиях из черных металлов.

2) Неферромагнитные электропроводные покрытия на электропроводных ферромагнитных основаниях. К данной группе задач относится измерение толщины большинства гальванических покрытий (хром, цинк, медь и др.), углепластиков, лакирующих покрытий на изделиях из черных металлов.

3) Ферромагнитные электропроводные покрытия на электропроводных неферромагнитных основаниях. К данной группе задач относится измерение толщины электролитического никеля на изделиях из цветных металлов.

4) Неферромагнитные электропроводные покрытия на электропроводных неферромагнитных основаниях. К данной группе задач относится измерение толщины оловянных и медных покрытий на цветных металлах и др.

В настоящее время для контроля толщины гальванических покрытий разработано достаточно много методов разрушающего и неразру-

шающего контроля, основанных на различных физических принципах. Рассмотрим современное состояние основных из этих методов, особенности комплексного применения приборов, реализующих их и вопросы обеспечения достоверности результатов измерения.

Кулонометрический метод измерения толщины покрытий основан на анодном растворении покрытия и фиксации времени, требуемого для его растворения. Момент окончания растворения определяется по скачкообразному изменению потенциала. Связь между толщиной T и площадью удаляемого покрытия, его характеристиками, силой тока и временем, необходимым для его растворения описывается выражением:

$$T = (a/S\rho)It, \quad (1)$$

где a , ρ - электрохимический эквивалент и плотность металла покрытия, соответственно; S - площадь зоны травления; I - сила тока в течение всего измерения; t - время с момента включения тока до скачкообразного изменения потенциала. Площадь зоны измерения определяется диаметром уплотнительного кольца измерительной ячейки и является постоянной величиной. В этом случае при постоянной величине I ,

$$T = h_t t, \quad (2)$$

где h_t - толщина слоя, снимаемая в заданном режиме за единицу времени (скорость травления).

На рис. 1 изображено схематическое представление кулонометрического метода измерения.

Для обеспечения постоянных условий измерения электролит в измерительной ячейке должен непрерывно перемешиваться. При протекании тока I через измерительную ячейку потенциал E остается практически постоянным до момента, когда покрытие полностью разрушится. В момент разрушения происходит "скачок потен-



Рис. 1. Схематическое представление кулонометрического метода измерения и изменения потенциала.

Fig. 1. Block representation coulometric measurement method

циала". Засекая время между скачками потенциала, можно рассчитать толщину каждого из слоев многослойных покрытий.

В связи с тем, что в данном методе осуществляются косвенные измерения, для градуировки применяют меры толщины покрытий, представляющие собой сочетание покрытий и оснований, изготовленных из материалов, для которых предназначен конкретный толщиномер покрытий. При этом обычно достаточно, чтобы меры воспроизводили лишь одну из комбинаций материалов покрытий и оснований. По своей природе кулонометрический метод является разрушающим, но при малой разрушаемой площади, надлежащем выборе мест измерений на крупных изделиях или использовании образцов свидетелей этот недостаток преодолим. Для случаев, когда разрушение покрытия на изделиях недопустимо, разработаны кулонометрические толщиномеры с возможностью восстановления гальванического покрытия. Для восстановления гальванического покрытия на изделии после проведения измерений в измерительной ячейке заменяют электролит, меняют полярность электрода и пропускают ток в течение требуемого времени. Суммарное время измерения толщины покрытия и его восстановления при этом возрастает примерно в 2-2,5 раза [1].

К основным достоинствам кулонометрического метода измерения толщины металлических покрытий можно отнести:

- независимость от технологии нанесения покрытий;
- независимость от состава электролитов;
- низкая чувствительность к изменению геометрии поверхности;
- возможность измерения большой номенклатуры однослойных и многослойных металлических покрытий в диапазоне от 50 нм до 75-100 мкм;
- малый диаметр зоны измерения (от 0,25 мм).

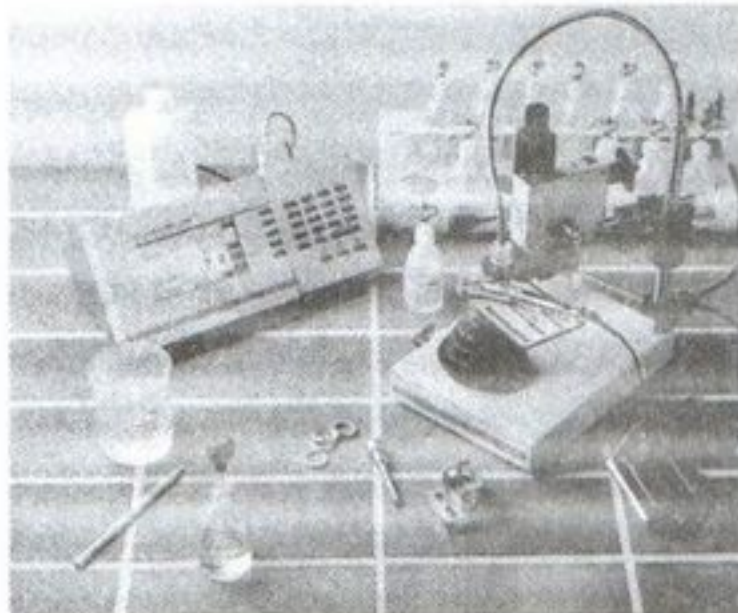
К недостаткам кулонометрического метода можно отнести:

- достаточно большую абсолютную погрешность измерения ΔT , которая составляет $\pm [(0,05 \pm 0,07)T + 0,5]$ мкм;
- сложную методику проведения измерений и сложное дорогостоящее оборудование;
- необходимость использовать электролиты;
- возможность только выборочного контроля в лабораторных условиях.

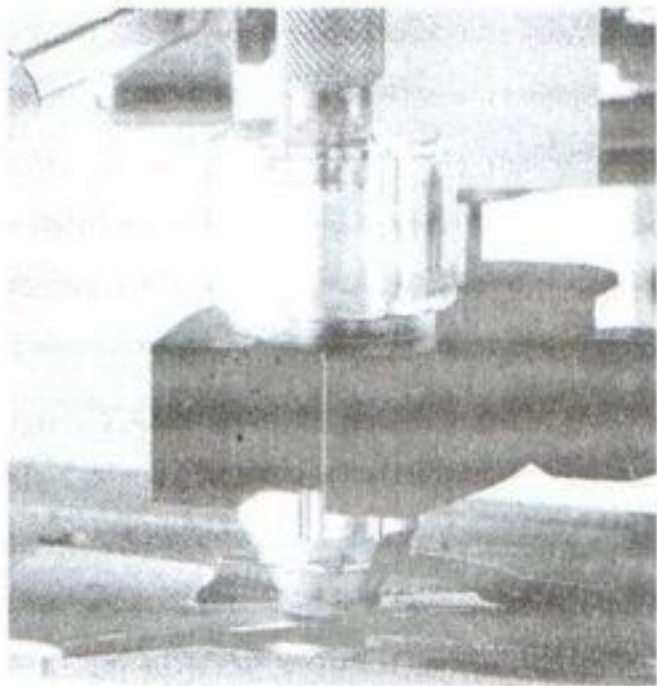
Кулонометрические толщиномеры представляют интерес при отладке и поддержании на соответствующем уровне технологий нанесения покрытий (особенно малой толщины) в условиях массовых производств.

Кулонометрические толщиномеры выпускают ряд фирм. Ведущие позиции занимают

фирмы *Helmut Fischer u ElektroPhysik*, серийно выпускающие приборы *Coulescope CMS* (рис. 2) и *GalvanoTest*, соответственно.



а)



б)

Рис. 2. Внешний вид толщиномера Coulescope CMS с принадлежностями (а) и измерительная ячейка в штативе при проведении измерений (б).

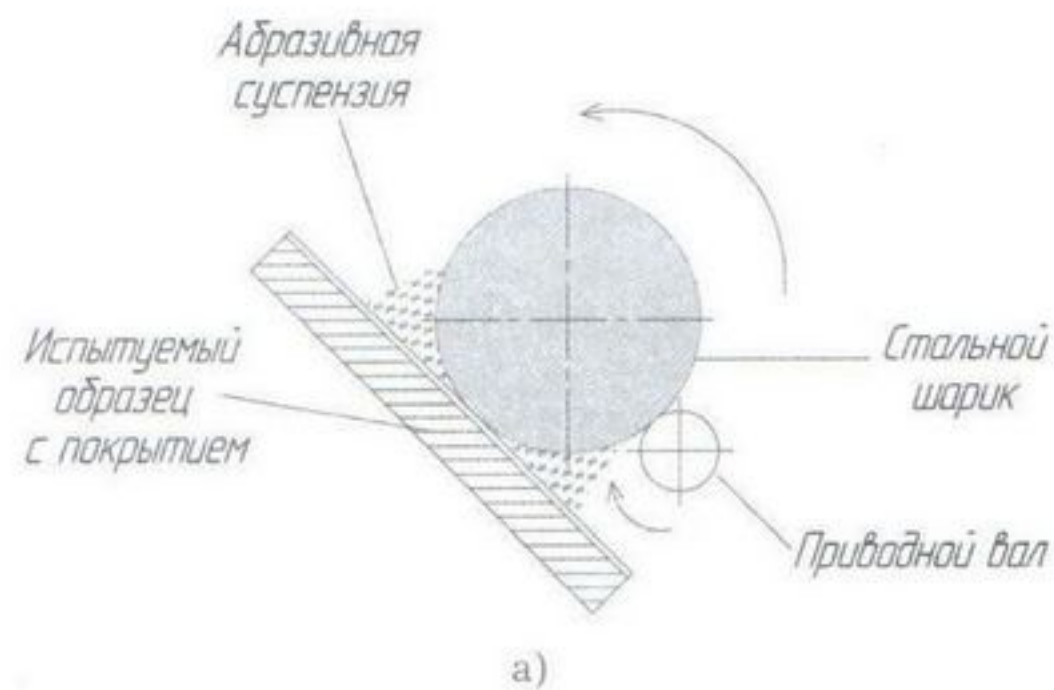
Fig.2. Appearance of thickness meter Coulescope CMS with accessories (a) and the transducer (a measuring cell) in a mount at carrying out of measurements (b)

Приборы имеют близкие характеристики и предназначены для измерения большой номенклатуры покрытий в соответствии с более чем семьдесятю технологическими процессами их нанесения. Минимальный диаметр зоны измерения 0,56 мм. Скорость снятия покрытий от 0,3 до 40 мкм/мин.

Метод расчета толщины покрытий шаровым истиранием основан на измерении размеров сферического отпечатка, возникающего при микроабразивном истирании под воздействия вращающегося стального шарика [2].

На рис. 3 изображены схема и внешний вид толщиномера, реализующего метод шарового истирания.

Стальной гладкий шарик имеет две точки опоры – на вращающийся приводной вал и на плоскость образца с покрытием. Нагрузка в зоне контактного трения определяется массой ша-



а)



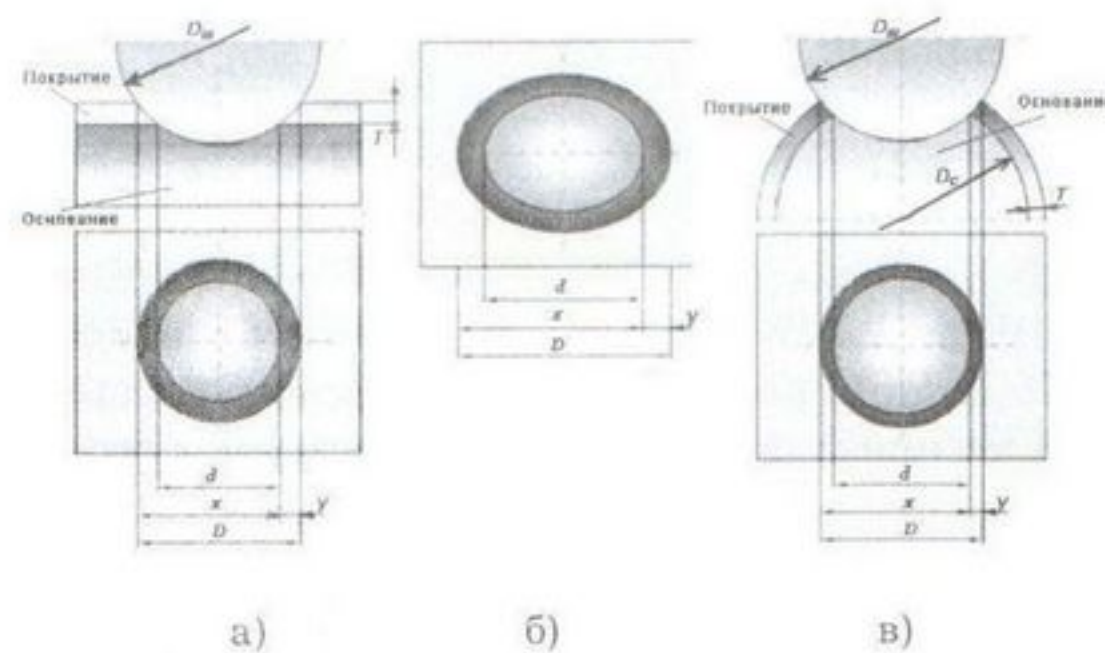
б)

Рис. 3. Схема (а) и внешний вид (б) толщиномера шарового истирания.

Fig. 3. The circuit (a) and appearance (b) the spherical abrasion thickness meter

рика и углом наклона образца к горизонту. Износ обеспечивается присутствием абразивной суспензии, содержащей взвешенные в воде микронные частички SiC, алмаза и др.

В зоне контакта образуется кратер с зоной износа покрытия и зоной износа основания (рис. 4).



а)

б)

в)

Рис. 4. Внешний вид кратера износа: а) плоского образца, б) цилиндрического образца, в) сферического образца.

Fig.4. Appearance of a wear crater: (a) flat specimen; (б) cylindrical specimen; (в) spherical specimen

По измеренным геометрическим характеристикам зон в соответствии с обозначениями рассчитывается T . Для плоских и цилиндрических изделий:

$$T = (D^2 - d^2)/4D_m \approx xy/D_m \quad (3)$$

Для сферических изделий:

$$T = xy/(1/D_c - 1/D_m) \quad (4)$$

Погрешность измерения линейных размеров миллиметрового диапазона современных инструментальных измерительных микроскопов, сопрягаемых с компьютерами, составляет порядка $\pm (1 \div 2)$ мкм, что обеспечивает погрешность ΔT вычисления толщины порядка $\pm (0,01T + 0,1)$ мкм в диапазоне измерения от 1-2 до 80 мкм.

К достоинствам метода можно отнести:

- независимость результатов от физико-химических свойств покрытия и основания;
- высокую точность в широком диапазоне измеряемых толщин покрытий;
- отсутствие необходимости калибровки;
- простую методику проведения измерений;
- возможность измерения толщин многослойных покрытий.

К недостаткам метода можно отнести:

- относительно трудоемкий процесс измерения;
- разрушение покрытия в зоне измерения;
- необходимость использования инструментального измерительного микроскопа;
- необходимость проведения измерений в условиях, близких к лабораторным.

Метод шарового истирания целесообразно использовать в тех случаях, когда необходимо обеспечить высокую точность измерения, в том числе на сложнопрофильных серийных изделиях при отладке технологических процессов, а также для аттестации эталонных образцов гальванических покрытий всех типов, впоследствии используемых для поверки и калибровки электромагнитных толщиномеров. Толщиномеры шарового истирания выпускают фирмы CSM instruments (приборы Calotest и Calowear) и Константа (прибор Константа-Ш1). Приборы имеют удобную в эксплуатации конструкцию, большое число приспособлений и оснасток, комплектуются твердосплавными шариками диаметром от 10 до 40 мм. Время абразивного истирания покрытий составляет от нескольких секунд до 15 мин.

Магнитоиндукционный метод измерения толщины неферромагнитных покрытий на изделиях из ферромагнитных металлов основан на способности изменения магнитных свойств фер-

ромагнитных металлов под воздействием внешнего магнитного поля и, в свою очередь, изменении характеристик этого магнитного поля в объеме чувствительного элемента измерительного преобразователя [3]. Структурная схема чувствительного элемента магнитоиндукционного преобразователя представлена на рис. 5.

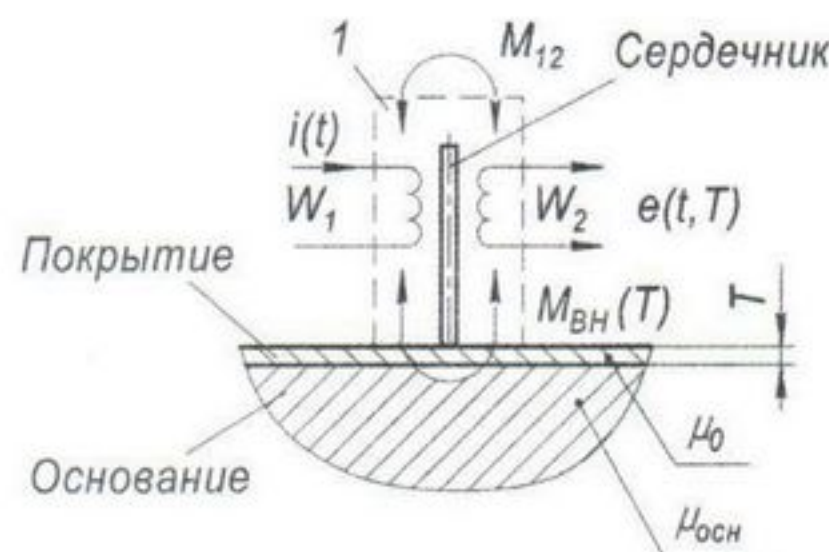


Рис. 5. Структурная схема чувствительного элемента магнитоиндукционного преобразователя.

Fig. 5. The sensitive element scheme of the magneto-inductive transducer

Чувствительный элемент имеет в своём составе, в общем случае, намотанные на сердечник из ферромагнитного материала возбуждающую W_1 и измерительную W_2 обмотки, коэффициент взаимной индукции между которыми при $T = \infty$ равен M_{12} . Величина M_{12} определяется геометрическими характеристиками обмоток и сердечника, а также относительной магнитной проницаемостью μ_c сердечника. Если при $T = \infty$ первичную обмотку запитать изменяющимся во времени возбуждающим током $i(t)$, то на вторичной обмотке наведется ЭДС $e(t, T = \infty)$, величина которой будет пропорциональна M_{12} . Традиционно в магнитоиндукционных толщиномерах используется гармонический ток возбуждения $i(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$, где I_0 – амплитуда тока, f – его частота. В большинстве случаев частота f выбирается в диапазоне до 50 Гц для практически полного исключения влияния вихревых токов, возникающих в электропроводных покрытиях, основании и элементах конструкции преобразователя, на результаты измерения.

В случае приближения чувствительного элемента к ферромагнитному основанию увеличивается вносимый коэффициент взаимоиндукции $M_{вн}(T)$, величина которого обратно пропорциональна T и пропорциональна относительной магнитной проницаемости $\mu_{осн}$ основания. В качестве первичного информативного параметра при этом выбирается амплитуда ЭДС $e(t, T)$, наводимой на обмотке W_2 , в зависимости от толщины покрытия T :

$$e(t, T) = -(M_{12} + M_{вн}(T))(di(t)/dt) \quad (5)$$

Измерительные преобразователи выпускаются в двух исполнениях – карандашного типа (рис. 6, а) и с внешним подпружиненным установочным корпусом (рис. 6, б).

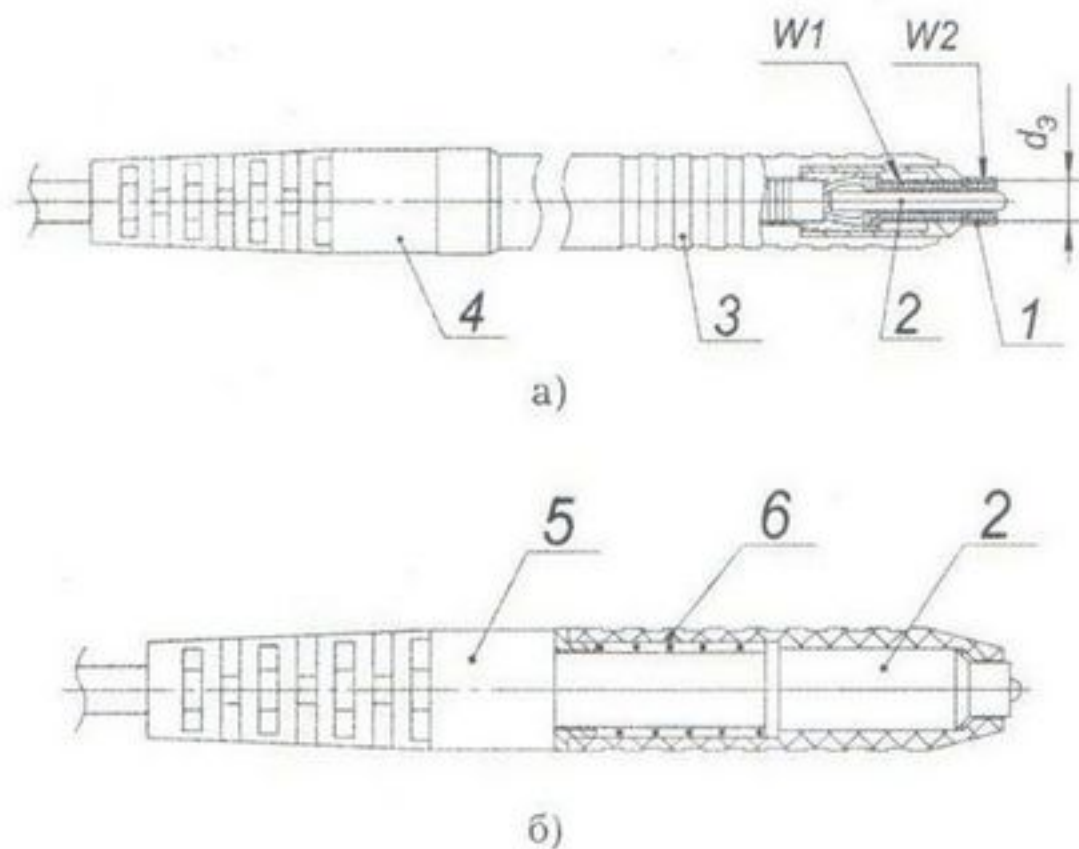


Рис. 6. Магнитоиндукционные преобразователи карандашного типа (а) и с подпружиненным установочным корпусом (б): W_1, W_2 – возбуждающая и измерительная обмотки; 1 – корпус – ферромагнитный экран; 2 – сердечник; 3 – наружный корпус; 4, 5 – кабельный ввод; 6 – внешний подпружиненный корпус.

Fig. 6. Magneto-inductive transducer of pencil type (a) and with the installation case (b): W_1, W_2 – exciting and measuring windings; 1 – the case – the ferromagnetic screen; 2 – the core; 3 – the external case; 4, 5 – cable entry; 6 – exterior of the case

Применительно к задачам измерения толщины гальванических покрытий, в том числе на малоразмерных изделиях, метрологические характеристики и долговечность преобразователей определяют следующие параметры. Диаметр ферромагнитного экрана d_3 определяет диаметр зоны измерения – способность проводить измерения на малоразмерных изделиях и на изделиях малого радиуса. Чем меньше диаметр зоны измерения, тем меньше дополнительная погрешность, обусловленная изменением радиуса кривизны поверхности изделия. У лучших преобразователей d_3 2,5÷4 мм. Сердечник должен изготавливаться из легированных сталей с твердостью HRC > 60 и обязательно покрываться хромом толщиной 5÷10 мкм. Это обеспечивает малую истираемость контактной поверхности в процессе эксплуатации. Контактная поверхность сердечника должна быть сферическая, ее диаметр должен быть равен диаметру сердечника. При этом будет обеспечена симметричность магнитной системы и возможность проведения измерений без дополнительной погрешности при отклонении оси преобразователя от нормали к поверхности на угол до 7°.

Преобразователь карандашного типа оптимален при измерении покрытий на сложнопрофильных малоразмерных деталях. Преобразователь с внешним подпружиненным установочным корпусом удобен при проведении измерений на плоских и цилиндрических изделиях.

Метод применим для измерения толщины практически всех металлических покрытий на сталях, в том числе и на слаболегированных нержавеющих сталях, а так же для измерения толщины электролитического никеля на цветных металлах.

Основным достоинством магнитоиндукционного метода является независимость результата измерения от электропроводности и химического состава покрытия. Основным недостатком магнитоиндукционного метода является то, что чувствительность к мешающему параметру (изменению зазора) и чувствительность к измеряемому параметру (изменению толщины металлического покрытия) одинакова. Это обстоятельство накладывает на объект измерения некоторые требования: шероховатость поверхности изделия при измерении малых толщин металлических покрытий по возможности не должна превышать R_a 1,6 мкм и на изделии в зоне измерения не должно быть резких изменений кривизны поверхности.

При выполнении условий по шероховатости поверхности изделия абсолютная погрешность измерения составляет $\Delta T \leq \pm [(0,01 - 0,02)T + 1]$ мкм в диапазоне измерения от 1 мкм до 2 мм. Влияние радиуса кривизны поверхности на результат измерения устраняется путем калибровки преобразователя на изделии без покрытия или эквивалентном ему образце.

Магнитоиндукционный метод измерения оптимален для измерения большинства металлических покрытий (Zn, Cr, Zn-Ni, Zn-Fe, Zn-Co и др.) на стальных изделиях с хорошо подготовленной поверхностью, линейные размеры которых больше или сопоставимы с диаметром зоны измерения преобразователей. Изготовление специальных оснасток, обеспечивающих повторяемость установки преобразователя на изделии, а также калибровка, позволяют использовать этот метод для измерения толщины покрытий на малоразмерных изделиях или изделиях сложной формы. Отсутствие воздействия на покрытие, простота и высокая скорость проведения измерений обеспечивают эффективное использование данного метода в условиях гальванических производств.

Ведущие позиции среди производителей магнитоиндукционных толщиномеров гальванических покрытий занимают следующие фирмы: *ElectroPhysik* (приборы серии *Minitest*), *Phynix* (прибор *Surfix-Pro S*), *Helmut Fischer* (приборы

серии FMP), List Magnetik (прибор Mega-Check), Константа (прибор Константа К6 гальванический), Elcometer (прибор 345). В комплект поставки могут входить преобразователи общего и специального назначения для измерения толщин гальванических покрытий на изделиях с хорошо подготовленной поверхностью в диапазоне от 1 мкм до $300 \div 2000$ мкм с $\Delta T \leq \pm [(0,01 \dots 0,03)T + 1]$ мкм в лабораторных и цеховых условиях.

Вихретоковые методы измерения толщины металлических покрытий основаны на анализе взаимодействия собственного высокочастотного электромагнитного поля вихретокового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в объекте контроля (покрытии и основании) и зависящих от электрофизических и геометрических параметров основного металла и покрытия [3].

Возможность измерения вихретоковыми методами поясняется рис. 7, на котором представлено электропроводное покрытие толщиной T и электропроводностью σ_n , на электропроводном (ферро- или неферромагнитном) основании электропроводностью $\sigma_{осн}$ в зоне вихревых токов.



Рис. 7. Распространение вихревых токов в электропроводном неферромагнитном покрытии и электропроводном неферромагнитном основании.

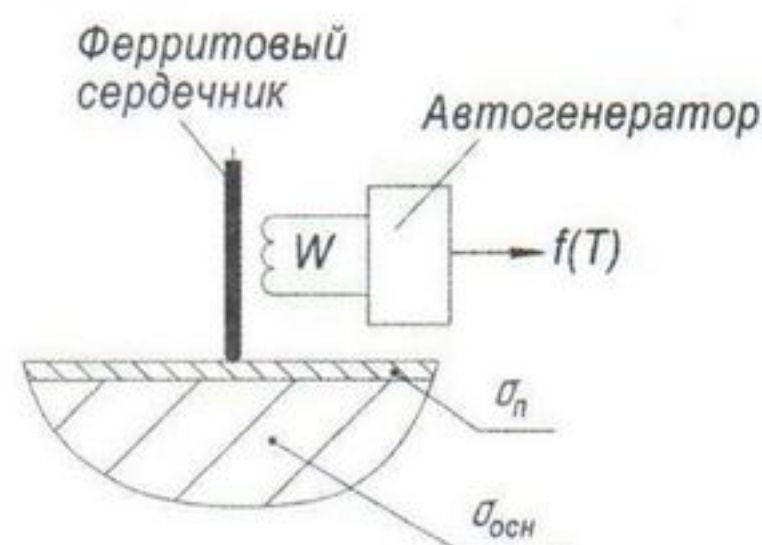
Fig. 7. Propagation of eddy current to an electro conductive nonferromagnetic coating and the electro conductive nonferromagnetic base

Вихревые токи $J_{вт}$, индуцированные в объекте контроля, распространяются как в покрытии, так и в основании. Вихревые токи в каждом слое оказывают свое, отличное друг от друга, влияние на результирующее магнитное поле системы преобразователь - объект контроля. Можно говорить о некотором интегральном значении электропроводности $\sigma_{и}$ объекта контроля в объеме распространения вихревых токов, изменяющемся в зависимости от толщины покрытия T . Так, если $T = 0$, то $\sigma_{и} = \sigma_{осн}$. При увеличении толщины покрытия от нуля до значения $T = \infty$, интегральная электропроводность объекта контроля будет изменяться от $\sigma_{осн}$ до σ_n .

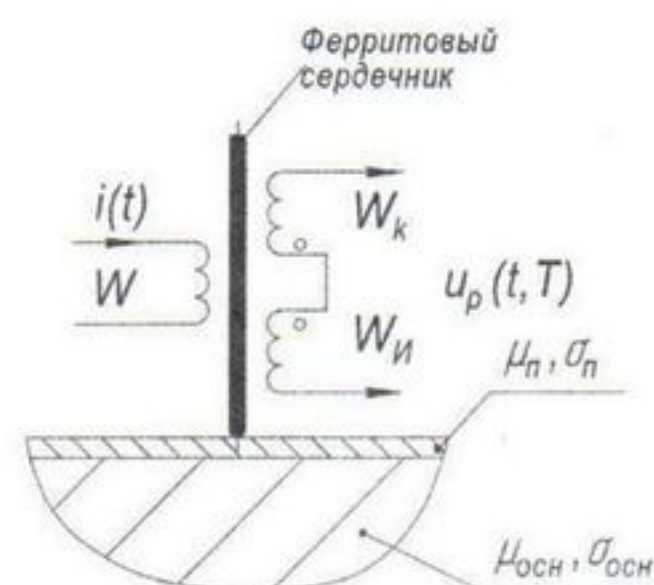
В настоящее время на практике широко применяются следующие вихретоковые методы измерения:

- вихретоковый частотный (параметрический) метод;
- вихретоковый фазовый метод;
- вихретоковый амплитудно-фазовый метод.

Чувствительный элемент вихретокового частотного преобразователя содержит одну намотанную на ферритовый стержень обмотку W , включенную в контур автогенератора, частота на выходе $f(T)$ которого зависит от толщины покрытия T (рис. 8, а).



а)



б)

Рис. 8. Структурная схема чувствительных элементов автогенераторного вихретокового частотного преобразователя (а), фазового и амплитудно-фазового преобразователей (б).

Fig. 8. The scheme of sensitive elements autogenerating eddy current the frequency transducer (а), phase also amplitude - phase transducers (b)

Данный метод позволяет производить измерение толщины неферромагнитных электропроводных покрытий на изделиях из цветных металлов по предварительно снимаемым и записываемым в память преобразователя градуировочным характеристикам для заданных параметров покрытие/основание. Как правило, это задачи измерения толщины меди и покрытий из драгоценных металлов, например, серебром, золотом, платиной, на изделиях из медных сплавов. Достоинством метода является возможность проведения измерений в широком диапазоне соотношений $\sigma_n/\sigma_{осн}$. Недостатки - относительно небольшой

диапазон T (от $1 \div 2$ до $20 - 30$ мкм), сильное влияние зазора, кривизны и шероховатости основания на результаты измерений. Эти обстоятельства накладывают на объект контроля ограничения, аналогичные магнитоиндукционному методу.

При выполнении условий по шероховатости поверхности изделия абсолютная погрешность измерения всех типов гальванических покрытий на цветных металлах обеспечивается на уровне $\Delta T \leq \pm [(0,01 \div 0,03)T + 1]$ мкм в диапазоне до 30 мкм. Влияние радиуса кривизны поверхности на результат измерения устраняется путем установки нуля преобразователя на изделии без покрытия.

Чувствительный элемент вихретоковых фазовых и амплитудно-фазовых преобразователей содержит намотанные на ферритовый сердечник обмотку возбуждения W и дифференциально включенные измерительную W_n и компенсационную W_k обмотки, с выхода которых снимается измерительное разностное напряжение $u_p(t, T)$ (рис. 8, б).

У вихретокового фазового преобразователя фазовый сдвиг $u_p(t, T)$ относительно тока возбуждения $i(t)$ зависит от T и σ_n [4]. Данный метод позволяет производить измерение толщины:

- ферромагнитных электропроводных покрытий на изделиях из черных металлов;
- ферромагнитных электропроводных покрытий на изделиях из черных металлов.

Достоинством метода является возможность проведения измерений в широком диапазоне T с подавлением влияния зазора (или нанесенного поверх металлического покрытия дополнительного диэлектрического покрытия), диаметра и шероховатости основания в широких пределах на результаты измерения. Недостаток – необходимость снятия и хранения градуировочных характеристик по группам покрытие/основание.

У амплитудно-фазового преобразователя амплитуда и фазовый сдвиг $u_p(t, T)$ относительно тока возбуждения $i(t)$ зависят от толщины покрытия T и от мешающих параметров. Данный метод позволяет производить измерение толщины:

- ферромагнитных электропроводных покрытий на изделиях из черных металлов;
- ферромагнитных электропроводных покрытий на изделиях из черных металлов;
- ферромагнитных электропроводных покрытий на электропроводных ферромагнитных основаниях.

Главным достоинством метода является возможность измерения таких толщин покрытий, у которых $\sigma_n < \sigma_{осн}$ с подавлением влияния зазора (или нанесенного дополнительного диэлектрического покрытия), диаметра и шероховатости основания в широких пределах на результаты измерений. Недостаток – необходимость снятия

и хранения градуировочных характеристик по группам покрытие/основание.

Вихретоковые фазовые и амплитудно-фазовые преобразователи позволяют проводить измерения на изделиях с шероховатостью до Ra 15 мкм, а также на малоразмерных деталях. При этом обеспечивается $\Delta T \leq \pm [(0,01 \div 0,03)T + 1]$ мкм в диапазоне от 1 до 200 мкм.

Конструкция вихретоковых преобразователей карандашного типа представлена на рис. 9. Миниатюрное исполнение чувствительных элементов обеспечивает диаметр зоны измерения менее 3 мм, что позволяет проводить измерения на малоразмерных деталях, например, крепеже (рис. 10).

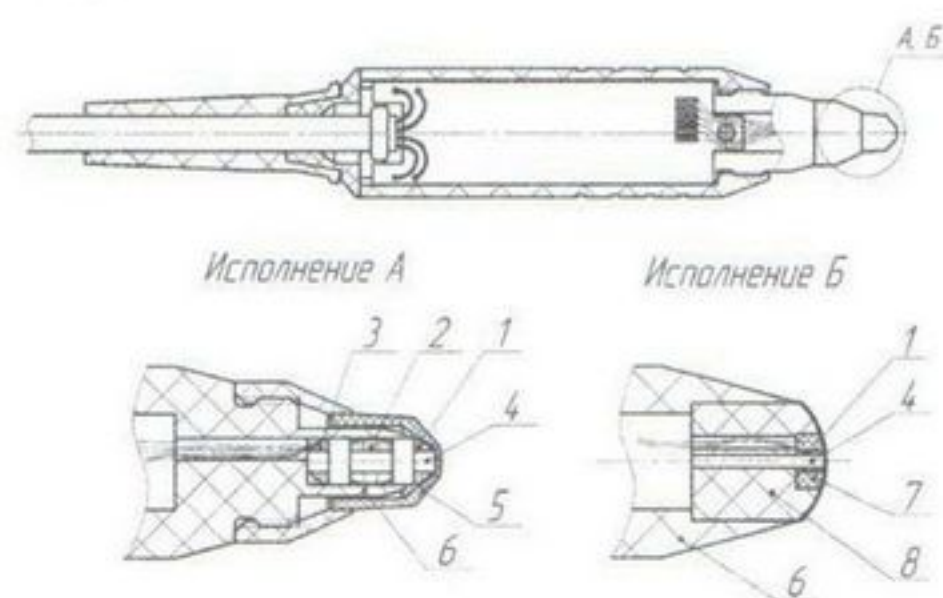


Рис. 9. Вихретоковый преобразователь карандашного типа и чувствительные элементы: фазовый (исполнение А) и частотный (исполнение Б): 1 – обмотка измерительная, 2 – обмотка возбуждения, 3 – обмотка компенсационная, 4 – ферритовый стержень, 5 – защитный колпачок, 6 – корпус, 7 – ферритовое кольцо.

Fig. 9. The eddy current transducer of pencil type and sensitive elements: phase (execution a) and frequency (execution b): 1. – measuring coil; 2. – active coil; 3. – compensating coil; 4. – ferrite rod; 5. – protecting cap; 6. – body; 7. – ferrite ring



Рис. 10. Применение вихретокового фазового преобразователя для измерения толщины гальванических покрытий на крепеже.

Fig. 10. Application eddy current phase transducer for measurement of a thickness of the galvanic coatings on fixture

Вихретоковые методы позволяют решать подавляющее большинство задач измерения толщины металлических покрытий на металлических ферро- и неферромагнитных изделиях. Они позволяют измерять не только физическую толщину покрытия, но также могут дать качественную оценку свойств покрытия, таких как, отклонение химического состава и наличие примесей и пор в покрытии. При комплектовании приборов аттестованными образцами покрытие/основание и методиками измерения существенно упрощается и ускоряется процесс измерения толщины защитных гальванических покрытий на малоразмерных стальных изделиях, повышается точность измерений.

Ведущие позиции среди производителей вихретоковых фазовых толщиномеров занимают фирмы: Helmut Fischer (приборы PHASCOPE PMP10 и PHASCOPE PMP10 Duplex) и Константа (прибор Константа К6 гальванический). В комплект поставки приборов могут входить преобразователи общего и специального назначения для измерения толщин практически всех типов гальванических покрытий в диапазоне от 1÷2 мкм до 30 - 2000 мкм с абсолютной погрешностью $\Delta T \leq \pm [(0,01 \div 0,03)T + 1]$ мкм в лабораторных и цеховых условиях.

Вихретоковые частотные преобразователи для измерения толщины неферромагнитных гальванических покрытий на цветных металлах выпускает фирма Константа (для комплектования прибора Константа К6 гальванический). В комплект поставки могут входить преобразователи специального назначения для измерения толщин гальванических покрытий на изделиях с хорошо подготовленной поверхностью в диапазоне до 30 мкм с абсолютной погрешностью на уровне $\Delta T \leq \pm [(0,01 \div 0,03)T + 1]$ мкм в лабораторных и цеховых условиях.

Внешний вид многофункционального толщиномера гальванических покрытий всех типов Константа К6 с комплектом преобразователей представлен на рис. 11.

Градуировка и поверка преобразователей в составе толщиномеров

Преобразователи в области малых толщин чаще всего градуируются на мерах толщины покрытий из металлических материалов (рабочих эталонах 2-го разряда [5]) в нормальных условиях. В качестве таких эталонов применяют меры толщины покрытий в диапазоне 2 - 1000 мкм. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей изготовления и аттестации рабочих эталонов 2-го разряда $\Delta T_{P3} \leq \pm [(0,1 \div 0,3)T + 0,025]$ мкм. В настоящее время для аттестации ступенчатых мер толщины покрытий (представляющих собой



Рис. 11. Внешний вид многофункционального толщиномера гальванических покрытий всех типов Константа К6 с комплектом преобразователей.

Fig. 11. Appearance of the multifunctional thickness meter of the galvanic coatings of all types "Constanta K6" with a set of transducers

металлические диски из материала изделия с нанесенным в центре одной из поверхностей покрытием заданной марки и толщины) чаще всего используют оптиметрический или профилографический методы, обеспечивающие погрешность измерения на уровне $\pm(0,1 \div 0,2)$ мкм в области малых толщин, что допустимо.

Иногда, в силу ряда причин не представляется возможным изготовление металлических мер толщины по [6], так как их характеристики не будут соответствовать реальным. В этой ситуации меры толщины производят из образцов реальной продукции по трудоемкой технологии изготовления шлифов согласно [7] или по методу шарового истирания. В последнем случае погрешность измерения малых толщин, в соответствии с выше изложенным составит $\Delta T_{ш} \leq \pm (0,1 \div 0,3)$ мкм. Метод шара применим также для изготовления рабочих эталонов 2-го разряда. Его преимущество в том, что отсутствуют требования к плоскостности сторон оснований, необходимые в случае использования оптиметров. Физические характеристики материалов мер толщины покрытий и оснований следует выбирать в соответствии с методом измерения, применяемом в конкретном толщиномере.

При изготовлении металлических мер для магнитоиндукционных и вихретоковых фазовых толщиномеров перед нанесением покрытий следует тщательно отобрать полированные стальные основания. Основания должны иметь разброс $\mu_{осн}$, обеспечивающий в диапазоне малых толщин пок-

рытий ($1 \div 5$ мкм) разброс показаний «нуля» не более $\pm (0,1 \div 0,3)$ мкм. Меры толщины должны быть размагничены.

При изготовлении металлических мер толщины для вихретоковых частотных и фазовых толщиномеров в качестве оснований часто необходимо использовать цветные металлы, требующие ручной доводки. Основания должны иметь разброс электропроводности $\sigma_{\text{осн}} \leq \pm (0,3 \div 0,5)$ МСм/м. Покрытия необходимо наносить в свежеприготовленном электролите по технологиям, соответствующим применяемым в производстве, где будет эксплуатироваться прибор. В процессах градуировки и поверки следует выдерживать постоянную температуру образцов $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$, а также обеспечивать возможно минимальный уровень электромагнитных полей.

Выполнение указанных условий изготовления и аттестации эталонных мер толщины и условий градуировки позволит обеспечить $\Delta T \leq \pm (0,01T + 1)$ мкм в области малых толщин в нормальных условиях.

Исследование среднего ресурса металлических мер толщины покрытий путем их многократных измерений магнитоиндукционным толщиномером показало, что до 3000 – 5000 измерений толщина металлических покрытий практически не изменяется.

Поверку толщиномеров желательно проводить на мерах толщины, аналогичных мерам, которые были использованы для их градуировки при изготовлении.

Калибровка и проведение измерений

Согласно [5] толщиномеры калибруют с помощью рабочих средств измерений (РСИ) – мер толщины покрытий с различными сочетаниями материалов оснований и покрытий, сгруппированных по назначению, с пределом допускаемой абсолютной погрешности изготовления $\Delta T_{\text{РСИ}} \leq \pm [(0,2 \div 0,3)T + 0,05]$ мкм.

Для калибровки магнитоиндукционных толщиномеров в области малых толщин часто применяют имитаторы покрытий – пленки из полиэтилентерефталата, накладываемые на образцы изделий без покрытия. Минимальные толщины имитаторов на основе полиэтиленовых пленок составляют порядка 5 – 10 мкм. Отбором пленок можно обеспечить изготовление имитаторов с разбросом не более $\pm 0,3$ мкм толщины по зоне диаметром около 6 – 10 мм. Чтобы исключить влияние износа пленок их необходимо заменять после проведения $30 \div 200$ измерений (в зависимости от толщины имитатора).

При измерении толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на ферро- и

неферромагнитных основаниях с помощью вихретоковых преобразователей количество мер толщины для калибровки может быть неоправданно большим. В настоящее время ведущие производители решают данную проблему следующим образом. В преобразователь встраивают энергонезависимую память, в которую записывают градуировочные характеристики «покрытие–основание», снимаемые на рабочих эталонах второго разряда. Погрешность ΔT практически аддитивно зависит от влияния параметров основания в области малых толщин и устраняется установкой «нуля» на образце изделия без покрытия [3].

В процессе калибровки и измерений на преобразователь воздействуют практически все мешающие параметры, определяемые свойствами покрытия, основания и условиями внешней среды. С учетом сказанного выше для магнитоиндукционных и вихретоковых фазовых толщиномеров локальный разброс $\mu_{\text{осн}}$ вызывает разброс показаний порядка $\pm (1 \div 3)$ мкм в области малых толщин; изменение температуры на 10°C может привести к погрешности измерения на уровне $0,5 \div 3$ мкм; износ имитаторов может обусловить неконтролируемую погрешность при калибровке. Для вихретоковых частотных и фазовых толщиномеров большое влияние на результат измерений оказывает разброс $\sigma_{\text{осн}}$ и $\sigma_{\text{п}}$ (возможно до $\pm (1 - 2)$ мкм. Для уменьшения влияния вариаций σ , μ и R_a рекомендуется выполнять калибровку и измерения с усреднением результатов по площади изделия или по партии изделий.

Заключение

Измерение толщин всей номенклатуры гальванических покрытий требует применения приборов, реализующих магнитоиндукционный и вихретоковые фазовые, амплитудно-фазовые и частотные методы измерения. Обеспечение гарантированной достоверности результатов измерения в соответствии с заявленными метрологическими характеристиками требует выполнения ряда условий, описанных выше.

При необходимости изготовления рабочих эталонных образцов оптимально использовать приборы, реализующие метод шарового истирания.

Для проведения ежегодной поверки в области малых толщин покрытий сертифицированные метрологические службы должны быть укомплектованы мерами толщины покрытий требуемых сочетаний материалов покрытий и оснований – рабочими эталонами 2-го разряда, изготавливаемыми по единой технологии согласно конструкторской документации, соответствующей контролируемым объектам с применением разрушающих методов, например шарового истирания.

Выполнение измерений с усреднением по заданной зоне контроля или в пределах определенного количества изделий при указанных мешающих параметрах позволяет получить среднее значение толщины покрытия с подавлением примерно в \sqrt{n} раз разброса показаний, обусловленного мешающими параметрами. При n 10 - 15 можно говорить о возможности проведения измерений технологической толщины металлических покрытий для рассмотренных методов измерения с $\Delta T \leq \pm 2$ мкм в области малых толщин с доверительной вероятностью $P = 0,95 \div 0,99$, что подтверждается опытом эксплуатации описанных выше приборов.

Перед началом эксплуатации необходимо провести испытания приборов для определения температурной и временной стабильности их показаний, по результатам которой регламентируется периодичность калибровки при работе в цеховых условиях.

Технологические допуски на толщину покрытия нельзя назначить, исходя из указываемых в рекомендациях по эксплуатации большинства современных толщиномеров $\Delta T \leq \pm (0,01T + 1)$ мкм в области малых толщин, так как они не будут обеспечены с требуемой доверительной вероятностью. При установлении допусков необходимо провести исследование мешающих параметров и учесть их влияние и только после этого разработать методику выполнения измерений и определить необходимую доверительную вероятность для допусков на толщину покрытия.

Список литературы

1. Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. - М.: «Издательство стандартов», 2004. - 264с.

2. Randall N. Finer particle size allows better coating characterisation with the Calotest // Application Bulletin № 5. URL: <http://www.csm-instruments.com/en/>

3. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. / Научное, методическое, справочное пособие. - СПб.: «Гуманитика», 2009. - 904 с.

4. ISO 21968. Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials - Measurement of coatings thickness - Phase-sensitive eddy-current method.

5. Р 50.2.006-2001. Государственная поверочная схема для средств измерения толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. Рекомендации по метрологии.

6. Неразрушающий контроль: Справочник в 7-ми т. /Под ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля. М.: Машиностроение, 2003.

7. ГОСТ 9.032-88. Покрытия металлические и неметаллические органические.

Сведения об авторах

Сясько Владимир Александрович - к.т.н.; доцент; Северо-Западный Государственный Заочный Технический Университет; ген. директор ЗАО «Константа», С. - Петербург, ул. Маршала Говорова, д.29 лит. 0, тел. (812) 3722904; тел. (812) 3770742, тел. моб.: (921) 9334343, e-mail: 9334343@ra52rambler.ru; office@constanta.ru.

Syasko V.A. -PhD, ass.prof., North-West State Technical University, director general, "Constanta Co.", St.Peterburg, 29, Marshal Golovanov Str., tel. +7(812) 3722904; +7(812) 3770742, tel.mob.: (921) 9334343, e-mail: 9334343@rambler.ru; office@constanta.ru.