

УДК 620.179
DOI

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ ПОКРЫТИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ



В. А. Сясько,
д-р техн. наук,
ООО «Константа»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: office@constanta.ru



С. С. Голубев,
канд. техн. наук,
Федеральное агентство
по техническому
регулированию и метрологии
РОССТАНДАРТ,
Москва, Россия.
E-mail: gobubev@gost.ru



А. И. Потапов,
д-р техн. наук,
Санкт-Петербургский
горный университет,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: apot@mail.ru



Н. И. Смирнова,
ФГУП «ВНИИМ
им. Д. И. Менделеева»,
Санкт-Петербург, Россия.
E-mail: nesterova.constanta@
gmail.ru

Рассмотрены современные и перспективные методы электромагнитной толщинометрии защитных и функциональных покрытий металлических изделий, а также алгоритмы преобразования измерительной информации, обеспечивающие расширение функциональных возможностей при измерениях и подавление влияния электрофизических и геометрических мешающих параметров объектов контроля. Даны сравнительные характеристики методов по назначению и приведены технические характеристики ряда отечественных и импортных толщиномеров.

Ключевые слова: покрытие, толщина, электромагнитный, толщиномер.

V. A. Syasko (LLC Constanta, St. Petersburg, Russia);

S. S. Golubev (Federal Agency on Technical Regulating and Metrology, Moscow, Russia);

A. I. Potapov (Saint-Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia);

N. I. Smirnova (D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Moscow, Russia)

METHODS AND MEANS OF ELECTROMAGNETIC THICKNESS GAUGING OF COATINGS ON METALLIC PRODUCTS

The features of the modern and perspective electromagnetic methods of non-destructive testing and also implemented on their basis of gages of thickness of protecting and functional coatings on the metal bases which are partitioned into six groups, depending on conductance and magnetic properties of structure the coating/base are considered In article.

Explicitly the offered structures of measuring transducers on the basis of the modern single-crystal microcontrollers with developed architecture and also algorithms of obtaining primary information for magnetic-induction impulse and teddy-current frequency and phase methods of measurement are described. The detailed analysis of primary informative and hindering parameters determined by geometrical and electro-physical parameters of products and conditions of carrying out measurements for each of methods is made. The methods of suppression of their influence providing reduction of uncertainty of measurements in case of maintenance of electromagnetic coating thickness gauges in industrial conditions are offered hardware-software (including test).

Offers on the choice of parameters and complete set oa devices depending on problems of measurement are given. The comparative review of production of the main foreign and domestic manufacturers of the feeler gages which have passed the state tests and included in the State register of gages is given.

Keywords: coating, thickness, electromagnetic, thickness gauge.



Статья поступила в редакцию 27.03.2017

Received 27.03.2017

Широкое применение защитных и функциональных покрытий металлических изделий, которые отличаются огромным разнообразием по своим свойствам и назначению, ставит неотложные задачи по обеспечению их качества и надежности. Покрытия на изделиях – это микронные антикоррозионные цинковые покрытия на крепеже, защитно-декоративные золотые покрытия на куполах церк-

вей, хромированные поверхности нарезной части орудийных стволов, никелированные спицы детских колясок. Для защиты деталей, работающих в условиях сверхвысоких температур, используют напыляемые металлические и композитные покрытия толщиной до нескольких миллиметров, в ряде случаев толщина покрытий специального назначения (например, теплозащитных) достигает 120...150 мм.

Покрытия и основания имеют в своем сочетании самые различные электрофизические свойства.

В данной статье мы попытаемся проанализировать сочетания покрытие/основание (сгруппировать их по возможности применения известных методов измерения толщины), рассмотреть особенности современных и перспективных способов реализации электромагнитных методов и средств измерения толщины покрытий на их базе с учетом возможности оптимизации и применимости для решения задач потребителей данного вида продукции, а также дать краткую характеристику основных производителей электромагнитных толщиномеров.

В большинстве случаев металлические изделия изготавливаются из черных металлов, алюминиевых и медных сплавов, нержавеющей стали, реже из титана, сплавов на основе золота, серебра и других металлов. В общем случае эти металлы и сплавы можно разделить на электропроводящие ферромагнитные, электропроводящие слабомагнитные, электропроводящие неферромагнитные. В качестве защитных покрытий применяют гальванические, напыляемые и плакирующие (цинковые, хромовые, серебряные, оловянные, медные, никелевые, алюминиевые и другие электропроводящие ферро- и неферромагнитные покрытия), лакокрасочные, порошковые, эмалевые, битумные и др. (в общем случае диэлектрические), анодные (диэлектрические).

С учетом сказанного задачи измерения толщины покрытий можно разделить по следующим сочетаниям покрытие/основание [1]:

- диэлектрические (лакокрасочные, порошковые, битумные, эмалевые и др.) покрытия, наносимые на изделия из черных (электропроводящих ферромагнитных) металлов;
- диэлектрические (лакокрасочные, порошковые, битумные, эмалевые и др.) покрытия, наносимые на изделия из цветных (электропроводящих неферромагнитных) металлов;
- электропроводящие неферромагнитные (гальванические – цинковые, хромовые, кадмиевые, медные и др.) покрытия на изделиях из черных металлов;
- электропроводящие неферромагнитные (гальванические – цинковые, хромовые, кадмиевые, медные и др.) покрытия на изделиях из цветных металлов;
- электропроводящие ферромагнитные (электrolитический никель) покрытия на изделиях из черных металлов;
- электропроводящие ферромагнитные (электrolитический никель) покрытия на изделиях из цветных металлов.

В настоящее время для измерения толщины защитных и функциональных покрытий на металлических основаниях наиболее перспективными, с учетом развития микросхемотехники, представляются три электромагнитных метода, описанных ниже.

Вихретоковый частотный метод. Традиционно для измерения толщины покрытий на металлических неферромагнитных основаниях применялся вихретоковый амплитудный метод. Однако использующие его толщиномеры подвержены влиянию сетевых и импульсных наводок, также он имеет недостаточный диапазон измерений. Более перспективными представляются реализации вихретокового частотного метода. Суть метода заключается в следующем (рис. 1): чувствительный элемент (обмотка $W1$, намотанная на ферритовый или диэлектрический стержень) преобразователя включается в контур автогенератора, частота собственных колебаний f которого определяется электрофизическими параметрами объекта контроля, на который он установлен.

Частота автогенератора f является информативным параметром такого преобразователя. При поднесении чувствительного элемента к покрытию толщиной T (в общем случае электропроводящему неферромагнитному, в частном – диэлектрическому), нанесенному на поверхность металла, в покрытии и металле наводятся вихревые токи, интенсивность которых в покрытии и основании зависит от T . Взаимодействие поля вихревых токов с полем обмотки приводит к изменению частоты колебаний автогенератора $f(t, T)$ вследствие изменения электрических параметров обмотки – активного и реактивного сопротивления. Чувствительность преобразова-

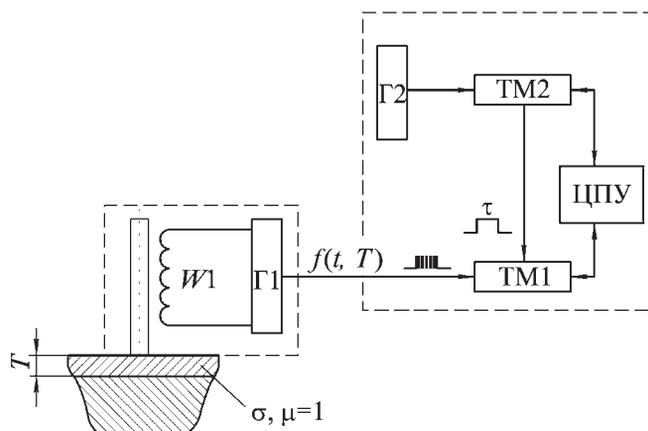


Рис. 1. Структурная схема вихретокового частотного преобразователя:

$G1$ и $G2$ – генераторы; $TM1$ и $TM2$ – таймеры; ЦПУ – центральное процессорное устройство контроллера; $W1$ – обмотка возбуждения чувствительного элемента

теля в общем случае определяется обобщенным параметром [2]

$$\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu\mu_0}, \quad (1)$$

где R – эквивалентный радиус чувствительного элемента; ω – круговая частота тока обмотки возбуждения; σ – эквивалентная электропроводность; μ – относительная магнитная проницаемость основания; μ_0 – магнитная постоянная.

В большинстве случаев при измерениях $\beta = 16...40$, т.е. активной составляющей вносимого сопротивления можно пренебречь. К тому же автогенераторная схема включения практически не чувствительна к изменению активного сопротивления обмотки. В этом случае частота автогенератора

$$f(t, T) = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{(L + L_{вн})C_1C_2}}, \quad (2)$$

где C_1, C_2 – номиналы конденсаторов автогенератора; L и $L_{вн}$ – собственная и вносимая (зависящая от T) индуктивности обмотки $W1$.

В процессе измерения вычисляют код $N(T) = \tau f(t, T)$, где τ – время преобразования. $N(T)$ обратно пропорционально T .

Использование данного метода и принципов построения преобразователя обеспечивает отстройку от влияния импульсных и сетевых наводок и возможность измерения не только диэлектрических, но и металлических неферромагнитных покрытий.

Магнитоиндукционный метод. До настоящего времени большинство магнитоиндукционных толщиномеров использует гармоническое магнитное поле частотой от 50 до 300 Гц. Однако это не

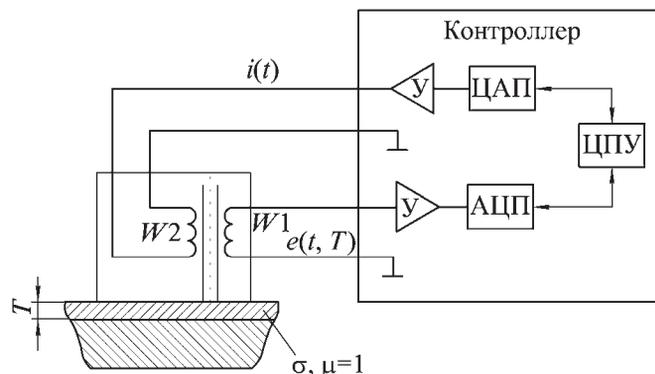


Рис. 2. Структурная схема магнитоиндукционного преобразователя:

$W1$ – обмотка возбуждения (первичная); $W2$ – вторичная обмотка; $У$ – усилитель; $ЦАП$ – цифроаналоговый преобразователь; $АЦП$ – аналого-цифровой преобразователь; $ЦПУ$ – центральное процессорное устройство контроллера

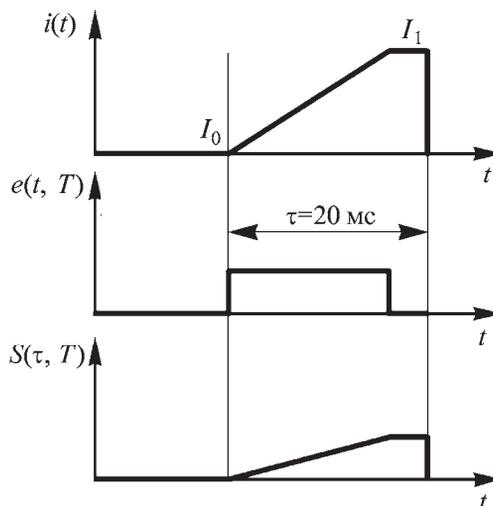


Рис. 3. Временные диаграммы работы магнитоиндукционного преобразователя

позволяет отстроиться от влияния наводимых вихревых токов, сетевых и импульсных наводок. Выполненный анализ показал, что использование магнитных полей, отличных от гармонических, позволяет разработать алгоритмы преобразования первичной измерительной информации, подавляющей влияние перечисленных мешающих параметров. Рассмотрим схему измерительного преобразователя и один из алгоритмов, демонстрирующие это. Структурная схема преобразователя представлена на рис. 2, временные диаграммы, описывающие его работу, представлены на рис. 3.

Первичная $W1$ и вторичная $W2$ обмотки чувствительного элемента наматываются на ферромагнитный стержень. Через обмотку $W1$ в процессе измерения пропускается ток $i(t)$, величина которого изменяется от I_0 до I_1 за время τ , кратное периоду сети (20 мс) и много большее времени существования вихревых токов, обусловленных протеканием импульса тока $i(t)$ через обмотку $W1$. Информативным параметром является площадь $S(\tau, T)$ ЭДС $e(t, T)$, наведенной на вторичной обмотке $W2$, за время τ (тем самым исключается влияние сетевых наводок и вихревых токов, наведенных в основании, покрытии и металлических элементах конструкции преобразователя, на погрешность измерения). При поднесении чувствительного элемента к покрытию толщиной T , нанесенному на поверхность ферромагнитного металла, ЭДС $e(t, T)$ увеличивается обратно пропорционально T , соответственно изменяется и $S(\tau, T)$.

В общем случае усилитель (токовый повторитель) возбуждает первичную обмотку $W1$ нарастающим током $i(t)$, скорость нарастания которого мо-

жет регулироваться контроллером по программе. На выходе вторичной обмотки W_2 наводится ЭДС

$$e(t, T) = K(M + M_{\text{вн}}(T))W_1W_2 \frac{di(t)}{dt}, \quad (3)$$

где K – коэффициент преобразования; M – коэффициент взаимной индукции обмоток; $M_{\text{вн}}(T)$ – вносимый коэффициент взаимной индукции; W_1 и W_2 – количество витков соответствующих обмоток.

Данное напряжение через встроенный усилитель $У$ поступает на вход АЦП, с помощью которого преобразуется с высокой частотой дискретизации в цифровой код $n_j(t, T)$, а контроллер производит суммирование получаемых кодов, т.е. вычисление площади $S(\tau, T)$ импульса ЭДС $e(t, T)$ на временном интервале τ .

Получаемый в результате преобразования код $N(\tau, T)$ определяется следующей зависимостью [4]:

$$N(\tau, T) = AmK(M + M_{\text{вн}}(T))W_1W_2(I_1 - I_0), \quad (4)$$

где A – коэффициент усиления усилителя; m – количество преобразований напряжение – код за время τ .

Вихретоковый фазовый метод. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего вихретоковый фазовый метод, представлена на рис. 4.

Чувствительный элемент трехобмоточного трансформаторного вихретокового преобразователя включает в свой состав намотанные на ферритовый стержень обмотку возбуждения W_1 и две включенные дифференциально обмотки – измерительную W_2 и компенсационную W_3 , подключенные к балансировочной схеме, с использованием которой обеспечивается получение разностной

ЭДС $\Delta e(t, T)$, равной вносимому напряжению и близкой к нулю при отнесении преобразователя от металлов. Информативным параметром преобразователя является фазовый сдвиг $\Delta\varphi(t, T)$ ЭДС $\Delta e(t, T)$ относительно напряжения возбуждения $u(t)$ частотой f . При поднесении чувствительного элемента к металлическому покрытию толщиной T , нанесенному на поверхность металлического основания, $\Delta\varphi(t, T)$ изменяется пропорционально T , а также электропроводности σ и относительной магнитной проницаемости μ покрытия и основания.

Во время измерения фазовый детектор формирует импульсы, длительность которых пропорциональна $\Delta\varphi(t, T)$, поступающие на вход интегратора. Формируемое интегратором постоянное напряжение $U(\Delta\varphi)$, а также пропорциональное $\Delta\varphi(t, T)$, оцифровывается интегрирующим АЦП с временем преобразования, кратным 20 мс, что исключает влияние сетевых и высокочастотных наводок.

Оптимальной для измерения толщины диэлектрических и металлических ферромагнитных покрытий на изделиях из черных (электропроводящих ферромагнитных) металлов является предложенная схема, реализующая магнитоиндукционный индукционный метод. К достоинствам использования можно отнести:

- возможность проведения измерений в широком диапазоне μ оснований;
- возможность проектирования геометрически подобных преобразователей на различные диапазоны контролируемых толщин от нескольких микрометров до десятков миллиметров, оптимальные по своим габаритам (зоне контроля) для конкретных применений, с возможностью работы с одним прибором;

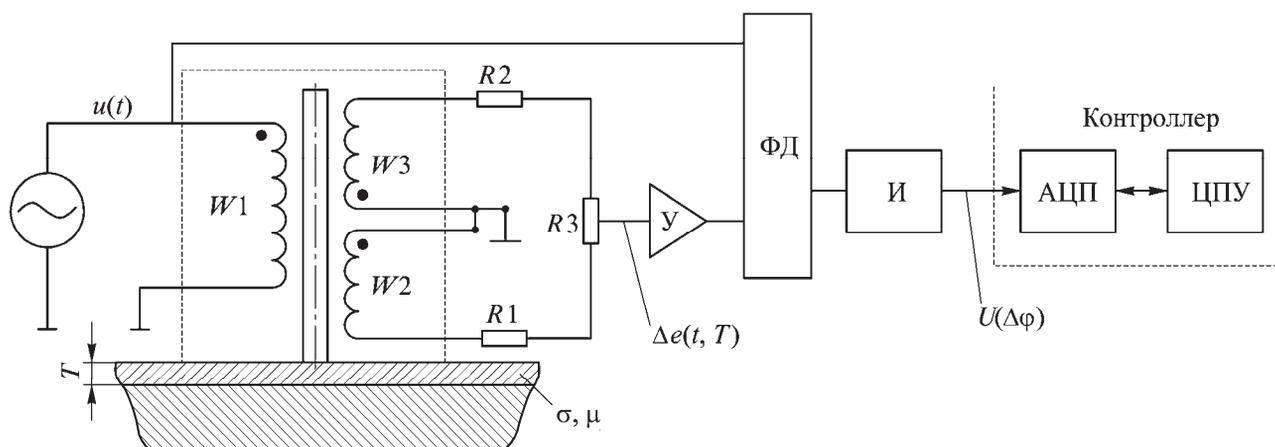


Рис. 4. Структурная схема вихретокового фазового преобразователя: W_1 – обмотка возбуждения; W_2 – измерительная обмотка; W_3 – компенсационная обмотка; $У$ – усилитель; $\Phi Д$ – фазовый детектор; $И$ – интегратор; $АЦП$ – аналого-цифровой преобразователь; $ЦПУ$ – центральное процессорное устройство контроллера

– независимость показаний от электропроводности оснований и покрытий при соответствующем τ .

В целях уменьшения зоны контроля и влияния краевого эффекта магнитоиндукционные преобразователи должны выполняться с внешними ферромагнитными экранами различной конструкции, что дает возможность изготовления малогабаритных преобразователей с диаметром зоны контроля до 2 мм. Такое исполнение позволяет проводить измерения на малогабаритных деталях (например, на внешней и внутренней поверхностях труб малого диаметра) за счет того, что на частотах $f = 1...3$ МГц обеспечивается $\beta = 1,5...8,0$.

Для измерения толщины диэлектрических и электропроводящих неферромагнитных покрытий на изделия из электропроводящих неферромагнитных металлов предпочтителен вихретоковый частотный метод. Достоинства этого метода:

- возможность измерений в широком диапазоне σ оснований;
- возможность проектирования геометрически подобных преобразователей на различные диапазоны контролируемых толщин от нескольких микрометров до десятков миллиметров), оптимальные по своим габаритам (зоне контроля) для конкретных применений, с возможностью работы с одним прибором.

В целях уменьшения зоны контроля и влияния краевого эффекта вихретоковые частотные преобразователи изготавливаются с внешними ферромагнитными экранами различной конструкции, что дает возможность изготовления преобразователей с диаметром зоны контроля менее 2,5 мм. Преобразователи на диапазон контроля до десятков миллиметров изготавливают без внешних экранов. Рабочие частоты выбирают в диапазоне от 1 до 15 МГц.

Измерение толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на изделиях из черных металлов может выполняться с использованием магнитоиндукционного и вихретокового фазового методов. Каждый из них применительно к этой задаче имеет свои достоинства и недостатки.

Достоинство магнитоиндукционного метода – независимость показаний от электропроводности покрытия.

Недостатки магнитоиндукционного метода:

- влияние шероховатости основания на результаты измерения (возможно уменьшение за счет проведения измерений с усреднением по зоне);
- трудность проведения измерений на малогабаритных деталях (винты, гайки, заклепки и т.д.) без специальных стенов.

Достоинства вихретокового фазового метода:

- малое влияние шероховатости на результаты измерения;
- возможность создания преобразователей с эквивалентным диаметром зоны контроля $\sim 1,5$ мм при $f = 1,2...3,0$ МГц, что позволяет проводить измерения покрытий (например, цинкования) на малоразмерных деталях (винты, гайки и т.д.) без специальных приспособлений;
- возможность измерений на изделиях с переменной и высокой намагниченностью (с использованием преобразователей без ферритовых сердечников).

Недостаток вихретокового фазового метода – зависимость результатов измерений от электропроводности покрытия, что обуславливает необходимость изготовления калибровочных образцов (натурных мер толщины) с покрытиями всех типов.

Таким образом, магнитоиндукционный метод оптимален для измерения толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на изделиях с хорошей подготовкой поверхности с размерами, существенно превосходящими диаметр зоны контроля преобразователя, в свою очередь вихретоковый фазовый метод предпочтителен для измерений на малоразмерных деталях (различный крепеж и т.д.), а также на намагниченных изделиях (с использованием преобразователя без ферритового сердечника).

Измерение толщины электропроводящих неферромагнитных покрытий на изделиях из цветных металлов возможно с использованием вихретоковых частотного и фазового методов. Ограничивающими условиями применения методов для данной группы задач измерения является отношение электропроводностей покрытия σ_n и основания σ_o .

Рассмотрим две возможные ситуации для покрытия (п) и основания (о): $\sigma_n < \sigma_o$ или $\sigma_n > \sigma_o$.

В случае если $\sigma_n < \sigma_o$ (например, покрытие химический никель на алюминиевом основании, олово-висмут на основании из латуни $\sigma_o = 16...19$ (ЛС59, Л96 и т.д.)), проведение измерений возможно с помощью вихретокового фазового преобразователя при условии, что β находится в пределах от 1,25 до 5. Преобразователь обеспечивает чувствительность к толщине электропроводящего покрытия и нечувствителен к зазору (в пределах порядка 0,025 эквивалентного диаметра зоны измерения).

При $\sigma_n > \sigma_o$ (например, хромовое покрытие на бронзе или латуни с низкой электропроводностью) для β в пределах от 1,25 до 5 чувствительность по фазе в диапазоне малых толщин покрытий слишком мала, а балансировка преобразователя по отстройке от зазора с сохранением чувствительности к толщине покрытия практически невозможна [6].

Таким образом, минусом данного метода для обеих рассмотренных ситуаций является наличие «мертвой зоны» преобразователя, когда при измерении относительно тонких покрытий (менее $1/1000$ эквивалентного диаметра преобразователя). Измерение малых толщин покрытия невозможно из-за пренебрежимо малой чувствительности фазы вносимого напряжения к толщине тонких покрытий, при этом линии годографов толщины покрытия для малых значений практически совпадают с линиями годографов зазора. Фаза выходного сигнала преобразователя (и балансировочной схемы) либо не изменяется вовсе, либо сперва изменяется в противоположную сторону и лишь затем начинает изменяться в нужную сторону [5].

Для устранения «мертвой зоны» преобразователя (отсутствию чувствительности вблизи нуля) можно использовать два приема:

- увеличение частоты f с одновременным уменьшением диаметра преобразователя (для сохранения неизменного β). Этот прием имеет технологические ограничения по габаритам преобразователя;
- увеличение разбалансировки преобразователя до величины, при которой в «мертвой зоне» появится некоторая чувствительность, но и отстройка от зазора не исчезнет полностью.

Для вихретокового частотного преобразователя при $\sigma_n > \sigma_0$ и значениях β от 10 до 50 изменение вносимого активного сопротивления пренебрежимо мало, а изменение вносимого реактивного сопротивления, обуславливающего в соответствии с формулой (2) информативный параметр, обеспечивает чувствительность к изменению T . Однако при этом будет наблюдаться чувствительность к изменению зазора и наклону. Для обеспечения перпендикулярной установки (исключающей зазор и наклон относительно поверхности изделия) возможно использование удерживающих устройств или специализированных оснасток, позволяющих точно позиционировать преобразователь на поверхности контролируемого объекта.

Для измерения толщины электролитического никеля на изделиях из черных металлов применим только вихретоковый фазовый метод в силу того, что покрытие имеет ярко выраженные магнитные свойства. При этом в зависимости от толщины покрытия оптимальная частота f лежит в диапазоне от 60 до 150 кГц.

Также следует учесть, что с использованием вихретокового фазового метода фактически измеряется объемная масса покрытия с электропроводностью σ_n в зоне контроля. Толщина покрытия, его электропроводность и пористость (защитные свойства) обуславливаются состоянием электролита в ванне (наличием солей) и соблюдением техпроцесса

нанесения. Показания толщиномеров, использующих вихретоковый фазовый метод, характеризуют защитные свойства покрытия и могут отличаться от результатов механических измерений.

Измерение толщины электролитического никеля на изделиях из цветных металлов можно выполнять с использованием магнитоиндукционного и вихретокового фазового методов. Магнитоиндукционный метод оптимален при измерении толщины покрытий в диапазоне больше 15 мкм на изделиях с хорошо подготовленной поверхностью (например, на образцах-свидетелях). Вихретоковый фазовый метод предпочтителен для покрытий со слабыми магнитными свойствами (серноокислый никель) и покрытий толщиной порядка 3...7 мкм. При поставке толщиномеров для решения данной задачи необходимым условием является изготовление и аттестация калибровочных образцов в соответствии с используемым техпроцессом нанесения покрытий для обеспечения сходимости результатов измерений с реальными.

Изложенное может позволить пользователям выбрать толщиномер и преобразователи к нему в зависимости от набора задач измерения толщины покрытий, которые необходимо будет решать.

Выбор толщиномера и его сервисных возможностей должен определяться требованиями к достоверности контроля, необходимостью документирования результатов, наличием сертификатов, эргономическими характеристиками, уровнем обслуживающего персонала и условиями применения.

Главными при выборе преобразователя являются его технические характеристики: погрешность и диапазон измерений, размер зоны контроля, температурная стабильность, габариты, устойчивость к истиранию, вид исполнения, учитывающий условия применения, наличие оснасток и приспособлений, а также специальных методик измерения, например, со сканированием поверхности и выдачей по результатам измерений полной статистической характеристики параметров покрытия.

В заключение представим краткий обзор продукции основных зарубежных и отечественных производителей толщиномеров покрытий в произвольной последовательности, не отражающей каких-либо приоритетов авторов. Потребители при желании могут более подробно ознакомиться с продукцией фирм в Интернете.

Elcometer – фирма, производящая приборы для комплексного контроля качества покрытий, традиционно выпускает широкую гамму электромагнитных вихретоковых и индукционных толщиномеров с большим набором преобразователей для контроля лакокрасочных, порошковых, эмалевых, битумных и других покрытий в диапазоне толщин от несколь-

ких микрометров до 30 мм. Имеется ряд специализированных преобразователей, в том числе для внутритрубного контроля, электронные блоки – от простейших до многофункциональных с матричными индикаторами с полным набором «джентльменских возможностей». Последней разработкой является малогабаритный многофункциональный прибор Elcometer 456 с цветным матричным индикатором и дружественным интерфейсом, реализующим вихретоковый частотный и магнитоиндукционный методы измерения. Толщиномер имеет возможность работать со всей номенклатурой преобразователей фирмы.

Helmut Fischer – немецкий производитель большой номенклатуры электромагнитных толщиномеров, от простейших однофункциональных серии MP до многофункциональных серии FMP, для контроля с использованием вихретокового частотного метода лакокрасочных и анодно-окисных покрытий на цветных металлах и магнитоиндукционного метода гальванических и лакокрасочных покрытий на черных металлах. Набор сменных преобразователей включает в себя специализированные для контроля в труднодоступных местах. Также выпускается специализированный прибор PHASCOPE PMP10, реализующий вихретоковый фазовый метод для измерения толщины цинковых и никелевых электролитических покрытий на изделиях из черных металлов, в том числе малогабаритных с плохо подготовленной поверхностью. Последней разработкой является многофункциональный толщиномер DUALSCOPE FMP100 на базе микрокомпьютера с мощной системой обработки и представления результатов контроля.

Также большую номенклатуру приборов предлагает фирма ElektroPhysik. Новым направлением в разработке толщиномеров является предложенное направление SIDSP – изготовление преобразователей с встроенными схемами ЦАП и АЦП, позволяющими проводить полную цифровую обработку измерительной информации, тем самым существенно повысив помехозащищенность, что весьма актуально в современных условиях. Толщинометры MiniTest реализуют вихретоковый частотный и магнитоиндукционный методы для измерения толщины гальванических и лакокрасочных покрытий на изделиях из цветных и черных металлов в диапазоне от нескольких микрометров до 30 мм.

Примерно похожую номенклатуру современных приборов на базе вихретокового параметрического и магнитоиндукционного методов контроля предлагают фирмы QUANIX, PHYNIX, LIST-MAGNETIK, KARLDEUTSCH, TIME, DEFELSKO.

Серию электромагнитных толщиномеров под своей товарной маркой выпускает ООО «КОНСТАНТА» – от простейших вихретоковых и магнитоиндукционных серии МК для контроля лакокрасочных покрытий до многофункциональных K5 и K6, использующих магнитоиндукционный, вихретоковый частотный и фазовый методы (для ЦЗЛ многопрофильных предприятий), позволяющих проводить контроль широкой гаммы покрытий – от микронных гальванических до сверхтолстых специального назначения. Последней разработкой является серия оригинальных специализированных вихретоковых фазовых и частотных преобразователей со встроенной электроникой для контроля электропроводящих покрытий на электропроводящих основаниях (ферро- и неферромагнитных) с возможностью проведения измерений на малогабаритных деталях. Толщинометры прошли государственные испытания и включены в Государственный реестр средств измерения. Также налажен выпуск и поверка мер толщины металлических и диэлектрических покрытий для градуировки, поверки и калибровки электромагнитных толщиномеров.

Библиографический список

1. **Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.** Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967. 144 с.
2. **Герасимов В. Г.** Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. М.: Энергия, 1972. 160 с.
3. **Неразрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под ред. В. В. Клюева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В. В. Клюев, В. Ф. Мужижкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин и др. М.: Машиностроение, 2006. 358 с.
4. **Потапов А. И., Сясько В. А., Соломенчук П. В. и др.** Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 1. Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Нестор-история, 2014. 480 с.
5. **Потапов А. И., Сясько В. А., Ивкин А. Е., Сясько А. В.** К вопросу о калибровке вихретоковых фазовых преобразователей на примере толщиномеров цинковых покрытий // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 17 – 22.
6. **Potapov A. I., Syasko V. A., Ivkin A. E., Syasko A. V.** On the Calibration of Eddy Current Phase Transducers Based on the Example of Thickness Gages for Zinc Coatings // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. N 9. P. 505 – 509.

Библиографический список

1. **Соболев В. С., Шкарлет Ю. М.** Накладные и экранные датчики. Новосибирск: Наука, 1967. 144 с.
2. **Герасимов В. Г.** Электромагнитный контроль однослойных и многослойных изделий. М.: Энергия, 1972. 160 с.

3. **Не разрушающий контроль:** справочник: в 8 т. / под ред. В. В. Ключева. Т. 6. Кн. 1. Магнитные методы контроля / В. В. Ключев, В. Ф. Мужичкий, Э. С. Горкунов, В. Е. Щербинин и др. М.: Машиностроение, 2006. 358 с.

4. **Потапов А. И., Сясько В. А., Соломенчук П. В. и др.** Электромагнитные и магнитные методы неразрушающего контроля материалов и изделий. Т. 1. Электромагнитные и магнитные методы контроля толщины покрытий и стенок изделий. СПб.: Нестор-история, 2014. 480 с.

5. **Потапов А. И., Сясько В. А., Ивкин А. Е., Сясько А. В.** К вопросу о калибровке вихретоковых фазовых преобразователей на примере толщиномеров цинковых покрытий // Дефектоскопия. 2013. № 9. С. 17 – 22.

6. **Potapov A. I., Syasko V. A., Ivkin A. E., Syasko A. V.** On the Calibration of Eddy_Current Phase Transducers Based on the Example of Thickness Gages for Zinc Coatings // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2013. V. 49. N 9. P. 505 – 509.