

УДК 620.1.08

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ. ПРОБЛЕМЫ МЕТОДОВ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

В. А. СЯСЬКО, С. С. ГОЛУБЕВ, Н. И. СМИРНОВА

ООО «Константа»

«Росстандарт»

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева»

Санкт-Петербург, Москва, Россия

UDC 620.1.08

PERSPECTIVE METHODS OF MEASURING PROTECTIVE COATINGS THICKNESS. PROBLEMS OF METHOD AND METROLOGICAL ASSURANCE

V. A. SYASKO, S. S. GOLUBEV, N. I. SMIRNOVA

Аннотация

Рассмотрены перспективные бесконтактные методы неразрушающего контроля для задач измерения толщины покрытий, их основные характеристики, а также информативные и мешающие параметры при измерении толщины покрытий. Проанализирована нормативная база по метрологическому обеспечению методов измерения толщины покрытий. Сформулированы предложения по разработке нормативных документов на рассмотренные бесконтактные методы измерения толщины покрытий, которые будут устанавливать требования к толщиномерам, мерам толщины покрытий, а также требования к их поверке и калибровке. Указаны меры, позволяющие обеспечить единство измерений в рассматриваемой области.

Ключевые слова:

толщина, покрытие, меры толщины, бесконтактный, вихретоковый, термография, рентгеновский, измерение.

Abstract

The article is devoted to prospective non-destructive non-contact methods for coating thickness measurement, their main characteristics, informative parameters and factors affecting measurement accuracy. The normative base for metrological assurance of coatings thickness measurement methods is analyzed. The formulated suggestions on the development of normative documents for the considered non-contact methods for coating thickness measurement establish requirements for thickness gages, coating thickness standards and their verification and calibration. Indicated measures to ensure the uniformity of measurements in the area under consideration.

Key words:

thickness, coatings, coating thickness standards, non-contact, eddy-current, infrared thermography, x-ray, measurement.



Как известно, покрытия – это слои, искусственно полученные на поверхности металлических или неметаллических изделий, предохраняющие их от коррозии, износа или придающие им заданные функциональные свойства: прочность, износостойкость, теплозащиту, радиопоглощение, антифрикционность и др. В зависимости от материала покрытия можно разделить на несколько основных групп: металлические, неметаллические, неорганические, лакокрасочные, пластмассовые, композиционные, покрытия из специальных материалов.

Толщина T покрытия нормируется для конкретных типов изделий и является одним из основных измеряемых параметров при неразрушающем контроле (НК) их качества.

В [1] указано, что для задач измерения T можно сформулировать следующие сочетания покрытие/основание:

- 1) ферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;
- 2) неферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;
- 3) диэлектрические покрытия на электропроводящих ферромагнитных основаниях;
- 4) ферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;
- 5) неферромагнитные электропроводящие покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;
- 6) диэлектрические покрытия на электропроводящих неферромагнитных основаниях;
- 7) ферромагнитные электропроводящие покрытия на диэлектрических основаниях;
- 8) неферромагнитные электропроводящие покрытия на диэлектрических основаниях;
- 9) диэлектрические покрытия на диэлектрических основаниях.

Известна большая группа задач измерения толщины покрытий в производственных условиях, не допускающих или существенно ограничивающих возможность механического контакта первичных измерительных преобразователей с поверхностью изделий в процессе контроля. В связи с этим, в настоящее время получают все большее развитие методы, обеспечивающие бесконтактный режим измерения T , такие как вихрековый фазовый, активный термографический, рентгеновские (радиометрические) флуоресцентный и β – отражения методы.

Дадим краткую характеристику данных методов НК применительно к указанным выше задачам измерения толщины.

Вихрековый вид НК – основан на анализе взаимодействия собственного электромагнитного поля вихрекового преобразователя с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте (объекте и покрытии) и зависящих от электрофизических и геометри-



ческих параметров основного металла и покрытия. В зависимости от задачи измерения и свойств материала основания и покрытия могут применяться различные функции изменения во времени электромагнитного поля (пробной энергии) и различные первичные информативные параметры, определяемые способом получения первичной информации. В практику бесконтактных измерений T прочно вошли вихретоковые толщиномеры, реализующие фазовый метод измерения, имеющий ряд преимуществ.

С использованием фазового метода вихретокового вида НК возможно бесконтактное проведение измерений T :

- электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях;
- электропроводящих ферромагнитных покрытий на электропроводящих ферромагнитных основаниях;
- электропроводящих неферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных основаниях.

На рис. 1. приведена структурная схема измерительного преобразователя, реализующего вихретоковый фазовый метод измерения толщины металлических покрытий на металлических основаниях [2].

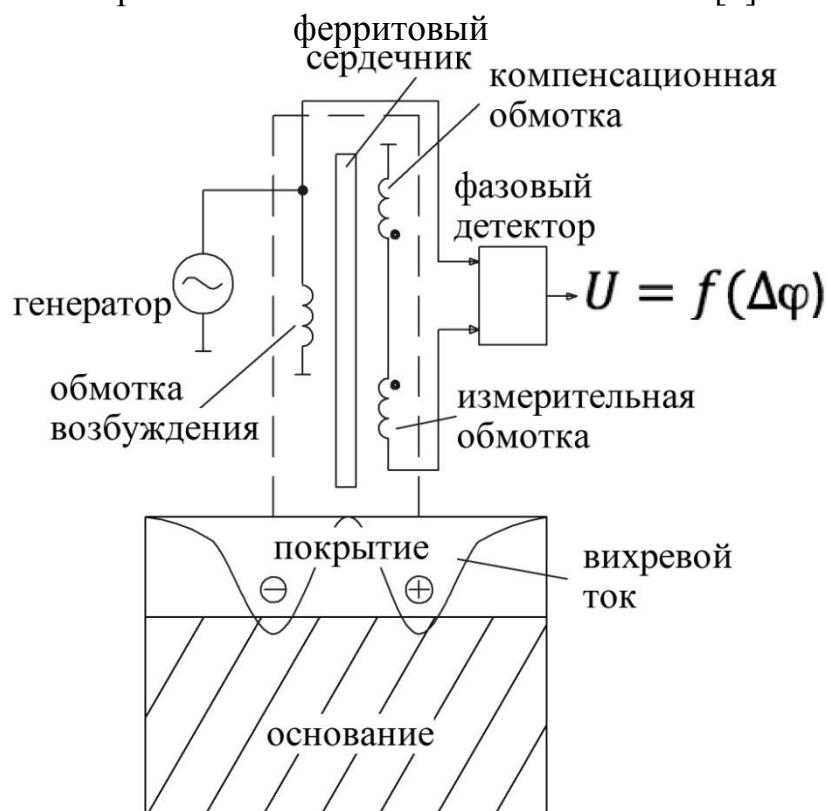


Рис. 1. Структурная схема вихретокового измерительного преобразователя, реализующего фазовый метод измерения толщины металлических покрытий на металлическом основании

Главным достоинством вихретокового вида НК является возможность разработки преобразователей с частотой тока возбуждения от десятков Гц до десятков МГц для измерения толщины покрытий в диапазоне от единиц микрон до десятков миллиметров с возможностью подавления влия-

ния зазора между преобразователем и покрытием, шероховатости покрытия и основания, а также радиуса основания. К недостаткам следует отнести зависимость показаний от ряда мешающих параметров: электропроводности σ и магнитной проницаемости μ оснований и покрытий. Также имеется ряд ограничений по возможным сочетаниям покрытие–основание.

Тепловой вид НК – основан на анализе параметров тепловых полей контролируемых объектов.

Активный синхронный термографический метод [3], обобщенная схема которого представлена на рис. 2, позволяет производить измерение T :

- диэлектрических покрытий на металлических основаниях;
- диэлектрических покрытий на диэлектрических основаниях.

Достоинством метода является возможность бесконтактных измерений в диапазоне толщин от нескольких микрон до 1 мм. Недостатком является зависимость результатов измерения от теплофизических (коэффициент теплопроводности λ , теплопроводность C , плотность ρ , коэффициент температуропроводности $a = \lambda/\rho C$, тепловая инерция $e = \lambda(C\rho)^{1/2}$, отражающая способность покрытия) и геометрических (в основном, шероховатость Rz) параметров покрытия и основания, а также адгезии покрытия к основанию.

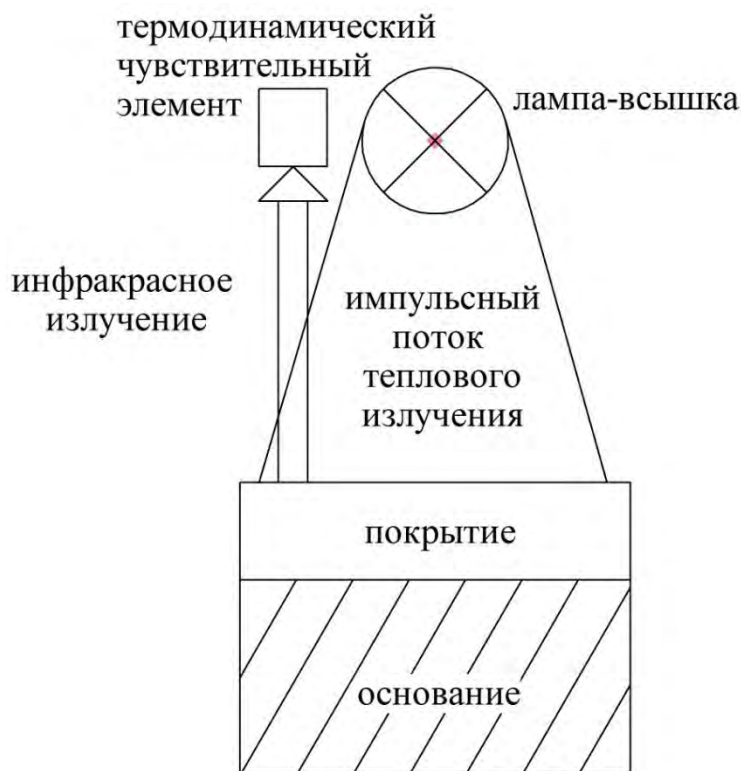


Рис. 2. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего активный синхронный термодинамический метод измерения толщины диэлектрических покрытий на металлических и неметаллических основаниях

Радиационный вид НК в основном использует фотонное (в том числе рентгеновское), нейтронное и электронное излучение.

Рентгеновский флуоресцентный метод – радиометрический метод неразрушающего контроля, предназначенный для измерения T металлических тонких и сверхтонких покрытий на металлических и диэлектрических основаниях, особенно малоразмерных. Также применим для измерения многослойных покрытий. На рис. 3. представлена обобщенная схема измерительного преобразователя, реализующего рентгено-флюоресцентный метод измерения толщины покрытий.

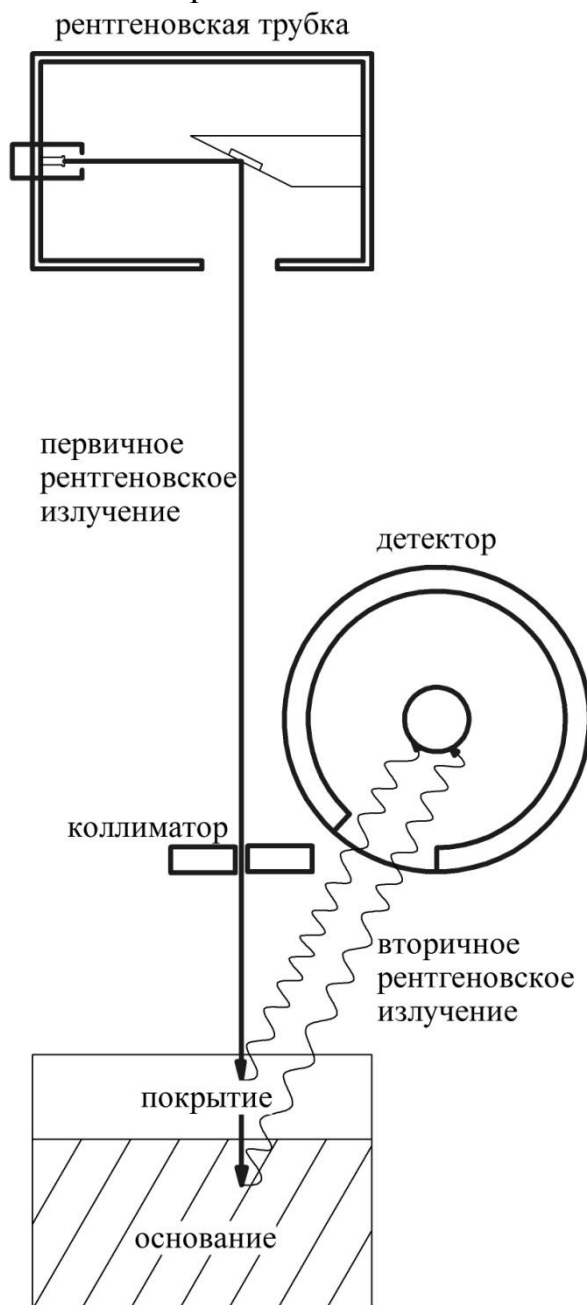


Рис. 3. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего рентгено-флюоресцентный метод измерения толщины покрытий

С использованием *радиометрического β -отражения метода*, обобщенная схема первичного преобразователя которого представлена на рис. 4, можно производить измерение T :

– диэлектрических покрытий на металлических и диэлектрических основаниях;

– металлических (в том числе многослойных) покрытий на металлических и диэлектрических основаниях.

Метод позволяет проводить измерения в диапазоне от сотых долей до сотен микрометров.

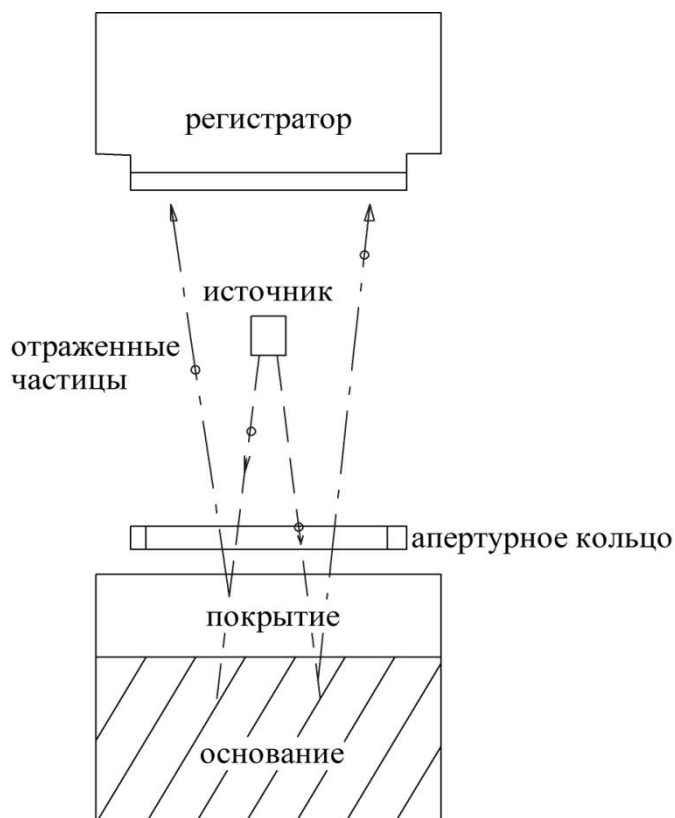


Рис. 4. Структурная схема измерительного преобразователя, реализующего β -отражения метод измерения толщины покрытий

Мешающими параметрами для радиометрических методов являются: плотность ρ и атомный номер $N_{ат}$ материалов покрытия и основания, шероховатость Rz .

Все указанные выше бесконтактные методы измерения T защитных и функциональных покрытий рассмотренных видов НК являются косвенными методами. Это означает, что настройка (градуировка), поверка и калибровка средств измерения должны, в соответствии с [4], осуществляться по эталонным мерам толщины, имитирующим измеряемый физический параметр (в данном случае T) в диапазоне его изменения при известных стабильных мешающих параметрах. Также следует учитывать, что каждый отдельно взятый метод рассматриваемых видов НК решает ограниченный круг задач измерения T и характеризуется отличающимися мешающими параметрами.

Существующая Государственная поверочная схема для средств измерения (СИ) толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм, утвержден-

ная в качестве рекомендации по метрологии Р50.2.006-2001 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне 1–20000 мкм» разработана ФГУП «ВНИИМС» взамен устаревшего ГОСТ 8.536-85. В качестве рабочих СИ применяют меры толщины и толщиномеры покрытий, сгруппированные по назначению в зависимости от вида материалов покрытий и оснований измеряемых объектов. На рис. 5. представлены девять типов толщиномеров из поверочной схемы.

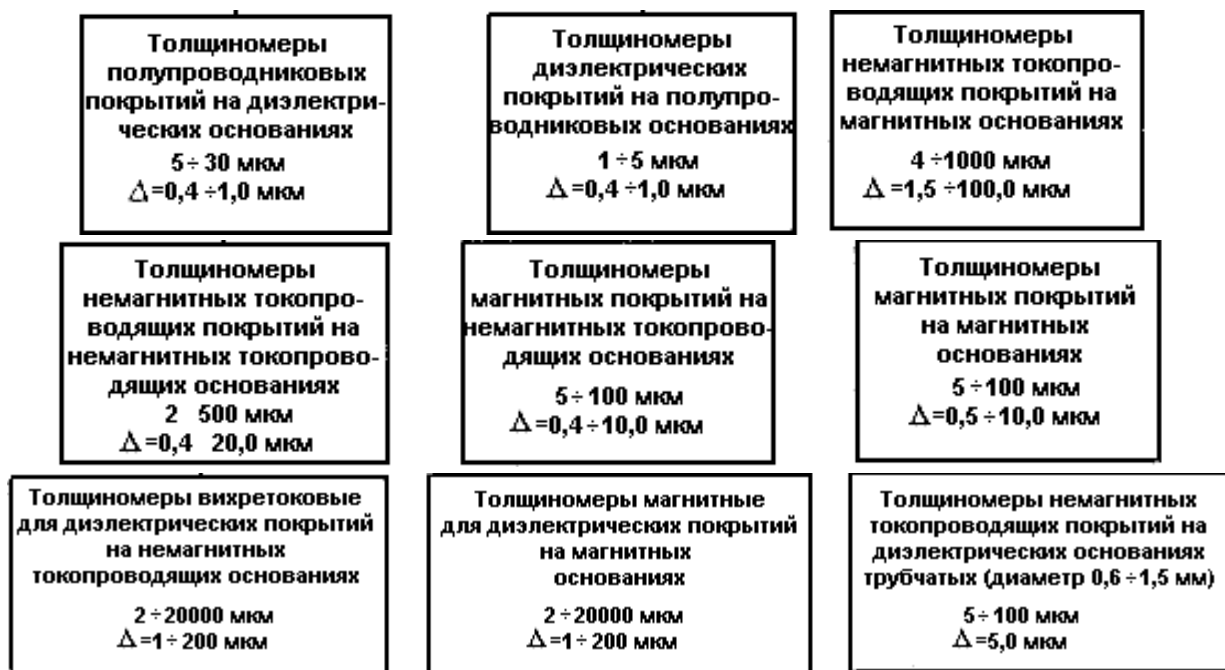


Рис. 5. Рабочие средства измерений по поверочной схеме Р50.2.006-2001

Выше были сформулированы сочетания покрытие/основание, анализ которых показывает, что в действующей поверочной схеме нет следующих типов толщиномеров:

- диэлектрических покрытий на диэлектрических основаниях;
- ферромагнитных покрытий на диэлектрических основаниях.

В соответствии с действующей поверочной схемой [5], основным средством поверки толщиномеров покрытий являются эталонные меры толщины покрытий и установки для поверки магнитных и вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий, пример которых представлен на рис. 6.

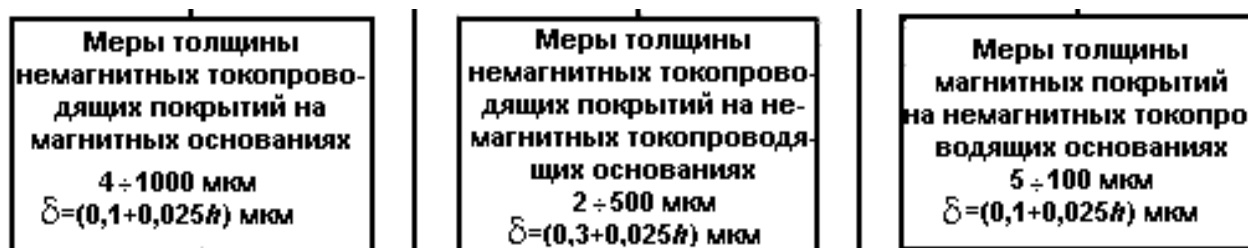


Рис. 6. Эталоны 2-го разряда по поверочной схеме Р50.2.006-2001

До 1988 г. на меры толщины действовал ГОСТ 25177-82. Продление срока действия ГОСТ 25177 невозможно, т.к. некоторые его положения устарели и не соответствуют современным требованиям. Вышеуказанные бесконтактные методы трех видов НК, используемые при разработке измерительных преобразователей толщиномеров защитных и функциональных покрытий, основываются на зависимости какого-либо информативного параметра от T . Однако, выше было указано, что информативные параметры зависят не только от измеряемой величины, но и от ряда мешающих параметров, которые указаны для каждого из рассмотренных выше методов НК. Вместе с тем, в соответствии с действующей нормативной документацией, при изготовлении, калибровке и поверке существующих мер толщины контролируются только их геометрические параметры: толщина покрытия, разнотолщинность, шероховатость поверхности, без учета мешающих параметров, которые непосредственно влияют на результат измерения бесконтактными толщиномерами, определяя при этом действительное значение T и неопределенность результата измерения. В связи с этим, представляется необходимой разработка новых стандартов на меры толщины, а также совершенствование поверочной схемы или разработка нескольких локальных поверочных схем.

Анализ современной стандартизации по НК контроля качества покрытий бесконтактными методами показал, что на сегодняшний день существуют нормативные документы на виды и методы НК, которые устанавливают требования к терминам и определениям, но не указаны требования к эталонам и средствам измерений, участвующих в передаче единицы и реализующим поверочную схему. Для устранения этого недостатка необходимо разработать нормативные документы на рассмотренные бесконтактные методы измерения толщины покрытий, которые будут устанавливать требования к толщиномерам, мерам толщины покрытий, а также требования к их поверке и калибровке. Анализ зарубежного опыта в части стандартизации показал следующее:

- стандарт озаглавляется по типу или типам покрытий и оснований, для которых может применяться рассматриваемый метод измерения;
- указывается задача измерения, в данном случае – измерение толщины покрытия;
- указывается рассматриваемый метод измерения.

В качестве примеров укажем следующие стандарты: ISO 21968, *Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials – Measurement of coating thickness – Phase-sensitive eddy-current method*; ISO 2360, *Non-conductive coatings on non-magnetic electrically conductive basis materials – Measurement of coating thickness – Amplitude-sensitive eddy-current method*; ISO 2361, *Electrodeposited nickel coatings on magnetic and non-magnetic substrates – Measurement of coating thickness – Magnetic method*.

Однако, если мы более подробно рассмотрим эти стандарты, то увидим, что в них достаточно подробно описаны задачи измерения и физиче-

ские основы метода. Однако, рассмотрение информативных и мешающих параметров и их влияние на результаты измерений носит описательный характер. Также нет четко изложенных требований к геометрическим и электрофизическим параметрам мер толщины покрытий, которые должны применяться для градуировки, поверки и калибровки толщиномеров. В стандартах отсутствуют схемы обеспечения прослеживаемости, без чего невозможна разработка поверочных схем.

Мешающие геометрические, физические, электрофизические и теплофизические параметры для каждого из бесконтактных методов должны контролироваться на этапах изготовления и поверки средств измерений в соответствии с представленной на рис. 7 схемой передачи размера единицы измеряемой величины T от мер к толщиномерам покрытий с учетом контроля мешающих параметров для каждого бесконтактного метода НК. В таком случае будет обеспечиваться метрологическая прослеживаемость.

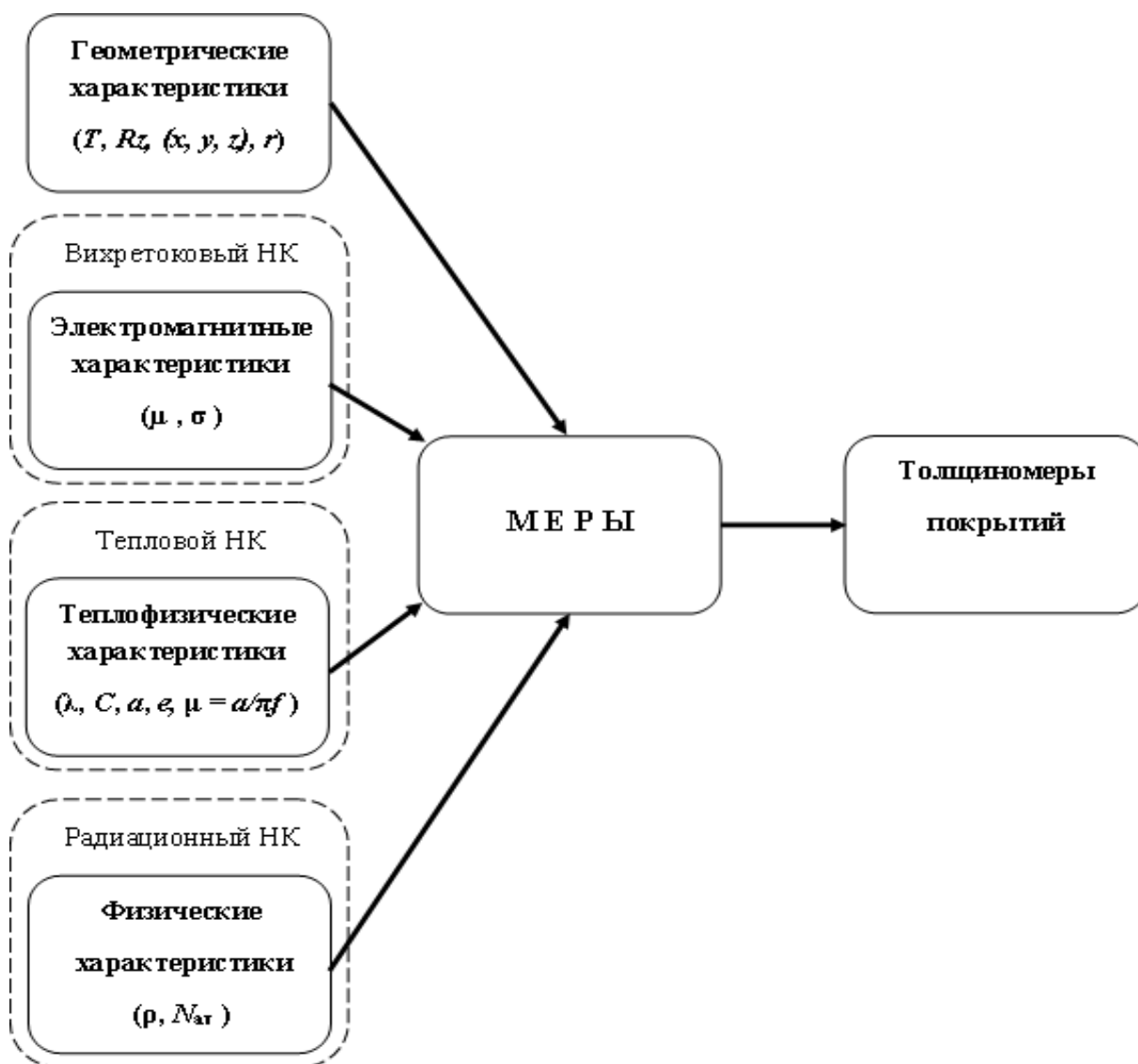


Рис. 7. Схема передачи размера единицы величины от мер к толщиномерам покрытий с учетом контроля мешающих параметров для каждого бесконтактного метода НК

Одним из вариантов решения рассматриваемой проблемы обеспечения единства измерений в области толщинометрии покрытий бесконтактными методами, а также координации работ метрологических служб, производителей и потребителей бесконтактных толщиномеров покрытий представляется необходимым разработка стандартов:

1) металлические покрытия на магнитных и немагнитных металлических основаниях. Измерение толщины покрытия вихретоковым фазовым методом;

2) неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия активным синхронным термографическим методом;

3) металлические и неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия β -отражения методом;

4) металлические и неметаллические покрытия на металлических и неметаллических основаниях. Измерение толщины покрытия рентгенофлуоресцентным методом.

Каждый стандарт должен быть выпущен в трех частях. Ч. 1. «Метод измерения». Ч. 2 «Поверка толщиномеров», которая должна содержать методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений. Ч. 3. «Калибровка и поверка мер толщины покрытий», которая должна содержать основные условия, требования к производству мер толщины, описание поверки мер толщины и метрологической прослеживаемости, а также методику расчета расширенной неопределенности результатов измерений при поверке.

На основании стандартов должны быть разработаны поверочные схемы и средства измерения для их реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабаджанов, Л. С.** Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий / Л. С. Бабаджанов, М. Л. Бабаджанова. – М. : Изд-во стандартов, 2004.

2. **ISO 21968:2005** Non-magnetic metallic coatings on metallic and non-metallic basis materials. – Measurement of coating thickness. – Phase-sensitive eddy-current method.

3. **Бариска, А.** Активный синхронный термодинамический метод измерения толщины диэлектрических покрытий / А. Бариска, Н. Райнке, В. А. Сясько // В мире НК. – 2016. – Т. 19, №1. – С. 14–16

4. **Потапов, А. И.** Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий / А. И. Потапов, В. А. Сясько. – СПб. : Гуманистика, 2009. – 904 с.

5. **Р50.2.006-2001** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне измерений толщины покрытий в диапазоне 1–20000 мкм. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2001.

E-mail: office@constanta.ru
golubev@gost.ru
nadezhda.i.smirnova@gmail.com