

**ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ (ФГУП «ВНИИМС»)**

На правах рукописи

Бабаджанова Марианна Леоновна

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕР ТОЛЩИНЫ
ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ПОВЕРКИ МАГНИТНЫХ
ТОЛЩИНОМЕРОВ**

Специальность: 05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2007 г.

Работа выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологической службы (ФГУП «ВНИИМС»)

Научный руководитель:

Кандидат технических наук

Н. А. Табачникова

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук

А. А. Самокрутов

Кандидат технических наук

В. А. Чуприн

Ведущая организация: **ЗАО «НИИИН МНПО «Спектр», г. Москва**

Защита состоится "24" мая 2007 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 308.001.01 в ФГУП " ВНИИМС" по адресу: 119361, Москва, ул. Озерная, 46.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМС».

Автореферат разослан _____ 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор технических наук _____ В. Г. Лысенко

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В настоящее время во всех отраслях промышленности широко используются защитные металлические и лакокрасочные покрытия. Одним из основных показателей качества покрытия является его толщина, от правильного выбора которой зависит эффективность защитной функции покрытия. С одной стороны необходимо обеспечить требуемую толщину покрытия, при которой ее защитные и функциональные свойства будут наиболее эффективны, а с другой стороны, важно уменьшить расходы по нанесению покрытия и сохранить при этом основные функции покрытия, такие как коррозионная защита, долговечность, хороший внешний вид изделия и т.д. Например, известно, что ущерб от коррозии составляют 2 - 5% от ВВП, поэтому действия, направленные на повышение точности измерений толщины покрытий для улучшения защиты от коррозии, приносят существенную экономическую выгоду.

Очевидно, что необходимость повышения точности измерений толщины покрытий является экономически обоснованной.

Для контроля толщины покрытий используют толщиномеры покрытий, основанные на разных принципах действия. Парк толщиномеров ежегодно увеличивается более чем на 3000 экземпляров, и соответственно растет нагрузка по их периодической поверке.

Среди общего числа толщиномеров покрытий доля магнитных толщиномеров покрытий составляет порядка 60%, поэтому разработка и усовершенствование средств поверки, а также методической и нормативной базы, для этой большой группы толщиномеров является актуальной задачей.

В настоящее время, как в России, так и за рубежом достигнутые пределы допускаемой погрешности составляют $\pm(0,03h+1)$ мкм в диапазоне от 0 до 20 000 мкм. Соответственно, пределы допускаемой погрешности средств поверки (мер толщины покрытий) должны быть в 2-3 раза меньше во всем диапазоне измеряемых толщин.

Разработкой средств поверки толщиномеров покрытий занимались многие отечественные ученые (М. Г. Богуславский с Е. Е. Шаровой, К. П. Баташев с Н. В. Макаренко, Р. А. Лаанеотс, Ю.Н. Николаишвили и др.), в результате чего к восьмидесятым годам прошлого столетия была создана система метрологического обеспечения измерений толщины покрытий, охватывающая также и магнитные толщиномеры покрытий.

Основными средствами поверки магнитных толщиномеров покрытий являются меры толщины с немагнитным покрытием, нанесенным на ферромагнитное основание, имитаторы толщины покрытий в виде диэлектрических пленок, а также специальные установки, воспроизводящие способ поверки по воздушному зазору.

Анализ, проведенный в диссертации, показал, что ранее разработанные средства поверки уже не удовлетворяют требованиям к поверке современных толщиномеров, поэтому необходимо разработать более современные средства поверки.

Показано также, что существует большая группа толщиномеров, предназначенных для измерений толщины покрытий в отверстиях печатных плат, которая не обеспечена средствами поверки, поэтому их разработка тоже актуальна.

Опрос ЦСМ и метрологических служб предприятий подтвердил, что эксплуатируемый парк мер толщины покрытий уже изношен, а новые меры не выпускаются, в связи с чем необходимо разработать и наладить производство современных мер толщины покрытий.

Для разработки современных мер толщины покрытий требуется провести научные исследования для выявления источников погрешности мер и установления научно-обоснованных подходов к устранению или уменьшению их влияния.

Анализ литературы показал, что в ранее проведенных исследованиях отечественных ученых по созданию мер толщины покрытий не рассматривались в достаточной степени такие вопросы как возможность применения

двухслойных покрытий на мерах, способы повышения равномерности покрытий по толщине, выбор материалов оснований, измерение особо тонких покрытий на мерах, расширение диапазона толщины и повышение прочности имитаторов и другие вопросы, обеспечивающие возможность создания современных средств поверки толщиномеров покрытий.

Таким образом, исследования по разработке современных мер толщины покрытий, а также соответствующих нормативных документов, представляют собой актуальную научно-практическую задачу.

Целью настоящей работы является разработка и исследование наборов мер толщины покрытий для поверки магнитных толщиномеров покрытий в диапазоне толщины от 1 до 20 000 мкм, исследование, установление и стандартизация технических требований к мерам толщины покрытий, модернизация поверочной схемы и методики поверки мер толщины покрытий, а также разработка технических основ создания трубчатых мер толщины покрытий для поверки средств измерений толщины покрытий в отверстиях печатных плат.

Методы и средства исследований. Для решения поставленных задач использованы профилографические и оптико - механические методы измерений, методы статистического анализа. Для экспериментальных исследований мер толщины покрытий использован прибор Form Talysurf фирмы Taylor Hobson (Англия) с программными приложениями Ultra Software и Talymap Software, прибор Микрон КМД фирмы ООО «Прецизика-Сервис» (Россия), микроинтерферометр «МИИ-4». Обработка результатов измерений, построение графиков осуществлялись с помощью программы Excel.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Исследована модель формирования покрытия на ступенчатой мере толщины покрытия и определены наиболее благоприятные условия для уменьшения погрешности мер толщины покрытий;
- Определен характер изменения неравномерности распределения толщины покрытия с увеличением толщины и ее влияние на погрешность меры;
- Определен характер зависимости шероховатости поверхности покрытия от толщины покрытия и ее влияние на точность мер;
- Впервые показана возможность использования двухслойных покрытий на мерах для поверки магнитных толщиномеров покрытий;
- Установлено, что оптимальным составом материалов для меры толщины двухслойного покрытия является медь (основной слой) и хром (дополнительный слой). Показано, что толщина дополнительного слоя хрома порядка 2 мкм на двухслойной мере толщины покрытий обеспечивает износостойкость мер;
- Доказана возможность измерений толщины особо тонких покрытий на мерах со значимым отклонением от плоскостности поверхности основания расчетно-профилографическим способом с пределами допускаемой погрешности $\pm 0,09$ мкм;
- Экспериментально доказано, что разработанный автором комбинированный набор мер толщины покрытий обеспечивает воспроизведение размера толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20 000 мкм с пределами допускаемой погрешности в 3 - 6 раз меньше погрешности толщиномеров, что удовлетворяет современным требованиям;
- Экспериментально доказана возможность изготовления натуральных трубчатых мер толщины покрытий в диапазоне толщин от 10 до 100 мкм для диаметров отверстий от 1 до 2 мм.

Практическое значение работы.

- Разработаны наборы мер толщины покрытий для поверки магнитных толщиномеров покрытий, которые внедрены в 16 метрологических организациях;
- Разработана и внедрена методика измерений мер толщины двухслойных покрытий в процессе их изготовления;
- Разработана и опробована на практике методика измерений мер толщины особо тонких покрытий (толщиной менее 1 мкм) со значимым отклонением от плоскостности поверхности основания;
- На основе полученных результатов исследований разработана и утверждена Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне толщины от 1 до 20 000 мкм (Р 50.2.006-2001);
- Проведенные исследования и полученные результаты позволили разработать также наборы мер толщины покрытий никеля на стали, цинка на стали, никеля на латуни и внедрить их на предприятиях страны.
- В результате проведенных исследований, созданы предпосылки разработки эталонных мер толщины покрытий трубчатых для передачи размера единицы длины толщиномеров покрытий в отверстиях малого диаметра.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Отклонение от плоскостности поверхности оснований мер и неравномерность толщины покрытий являются основными влияющими факторами, а их уменьшение служит основой повышения точности мер толщины покрытий.
2. Достигнутые значения отклонения от плоскостности оснований мер порядка 0,03 мкм и неравномерности толщины покрытия порядка 0,2 мкм, обеспечивают изготовление мер с погрешностью в 3 – 6 раз меньше, чем погрешность толщиномера.

3. Разработанные приемы позволяют изготавливать меры толщины с двухслойным покрытием – медь (основное) и хром (дополнительное) в диапазоне до 200 мкм с погрешностью, удовлетворяющей условиям поверки толщиномеров. При этом, долговечность таких мер соизмерима с однослойным покрытием из хрома.
4. Применение кварцевого стекла для имитаторов толщины в диапазоне не свыше 500 мкм обеспечивает более высокую износостойкость и пределы допускаемой погрешности не более $\pm 1\%$.
5. Разработанный комбинированный набор мер толщины покрытий, состоящий из мер толщины двухслойных немагнитных покрытий и имитаторов толщины из кварцевого стекла, позволяет воспроизводить размер толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20 000 мкм и обеспечивает поверку современных магнитных толщиномеров покрытий.
6. Измерение толщины особо тонких покрытий (до 1 мкм) на мерах со значимым отклонением от плоскостности основания, превосходящим толщину покрытия, возможно предложенным способом с пределами допускаемой погрешности $\pm 0,09$ мкм.
7. Предложенные технология и методика измерений толщины стенки трубочки являются предпосылкой создания трубчатых мер толщины покрытий в отверстиях диаметром от 1 до 2 мм в диапазоне толщины от 10 до 100 мкм с относительной погрешностью порядка 0,8%.
8. Результаты исследований послужили основой для разработки рекомендации по метрологии Р50.2.006-2001 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне 1,0-20000,0 мкм» и проекта стандарта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Меры толщины покрытий. Основные параметры и общие технические требования».

Реализация и внедрение результатов исследований. Работа выполнялась в рамках НИР «Разработка и исследование методики измерений ступенчатых эталонов толщины покрытий топографическим методом»; «Исследование и разработка общих технических требований к мерам толщины покрытий, их параметрам и размерам», «Проведение теоретических и экспериментальных исследований, направленных на создание государственного специального эталона единицы длины в области измерений толщины покрытий в отверстиях малого диаметра».

Результаты работы использованы при разработке рекомендации по метрологии Р50.2.006-2001 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне 1,0-20000,0 мкм» и проекта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Меры толщины покрытий. Основные параметры и общие технические требования».

Меры толщины покрытий прошли испытания с целью утверждения типа.

Изготовленные наборы мер толщины покрытий (всего 26 наборов) внедрены в 16 метрологических служб предприятий, среди которых ФГУП «УНИИМ», ФГУ «УралТест», ФГУ «Ульяновский ЦСМ», ФГУ «Удмуртский ЦСМ», Сергиево-Посадский филиал ФГУ «Менделеевский ЦСМ», ОАО «Волжский трубный завод», РКК «Энергия» им. С. П. Королева, ФГУП «Севмаш», ООО «АКА-Контроль», ОАО «Северский трубный завод», ОАО «Пластик» и др.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 6-ти научно-технических конференциях: Научно-техническая конференция «Молодые метрологи – народному хозяйству», г. Москва, 1999 г., 15-я Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», г. Москва, 1999 г., 3-я Международная конференция «Диагностика трубопроводов», г. Москва, 2001 г., Международная специализированная выставка «Промышленный

неразрушающий контроль», Конференция «Использование технологий промышленного неразрушающего контроля для повышения безопасности и надежности промышленных объектов», г. Москва, 2002 г.

Публикации. По основным результатам выполненных исследований опубликовано 6 статей, 1 монография в соавторстве, 6 тезисов докладов, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит аналитический обзор состояния вопроса, теоретическую часть, экспериментальные исследования, разработку мер толщины покрытий и методических вопросов, оценку полученных результатов и их внедрение.

Общий объем диссертационной работы 198 страниц, в том числе 50 рисунков, 13 таблиц, 3 приложения. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 49 наименований.

Содержание работы.

Во Введении обосновывается актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна результатов работы, изложены основные научные положения и результаты, представленные к защите.

Проведенный в первой главе анализ современного состояния метрологического обеспечения измерений толщины покрытий магнитными толщиномерами показал, что к настоящему времени разработано новое поколение магнитных толщиномеров покрытий. Прошли испытания с целью утверждения типа и внесены в Государственный реестр средств измерений более 30 типов магнитных толщиномеров российского и иностранного производства.

Они предназначены для измерений толщины немагнитных покрытий (диэлектрических и электропроводящих) на магнитном основании, охватывают диапазон толщины от 1 до 20000 мкм и имеют пределы допускаемой погрешности $\pm(0,03h+1)$ мкм.

Отмечено, что существует группа толщиномеров, предназначенных для измерений толщины покрытий в отверстиях печатных плат, которая не проходит поверку ввиду отсутствия соответствующих натуральных мер толщины покрытий.

В восьмидесятые годы прошлого столетия, благодаря работам отечественных метрологов, в СССР была создана система метрологического обеспечения измерений толщины покрытий. Основные положения этой системы распространялись и на магнитные толщиномеры покрытий. В частности, в соответствии с ГОСТ 8.502-84 для поверки магнитных толщиномеров покрытий применяют натурные меры толщины немагнитных покрытий на магнитном основании типа НТП на МО с покрытием из хрома на основании из стали 20. Диапазон воспроизводимых размеров толщины покрытий этими мерами составляет от 4 до 1000 мкм, погрешность находится в пределах $\pm(0,025h+0,2)$ мкм. Недостатком этого набора является ограниченный диапазон толщины покрытий, недостаточная точность, трудоемкость и дороговизна изготовления, что не удовлетворяет современным требованиям. Кроме того, в настоящее время этот набор не производится.

На практике для настройки и поверки магнитных толщиномеров покрытий применяют также имитаторы толщины покрытий в виде пленок и пластин из немагнитных материалов, которые используют путем наложения на свободное основание из стали. Имитаторы изготавливают из немагнитных материалов, а чаще всего из диэлектрических пленок (полиэтилен, фторопласт и т.п.). Основным недостатком имитаторов из пленки является их сминаемость и низкая износостойкость, особенно для малых толщин менее 50-60 мкм, а также погрешность более 5%.

Для поверки распространенных в то время аналоговых толщиномеров покрытий в соответствии с ГОСТ 8.502-84 использовались также разного исполнения установки для поверки по воздушному зазору. Однако, применение этого способа для современных цифровых магнитных толщиномеров покрытий оказалось невозможным из-за конструктивных особенностей таких толщиномеров.

Таким образом, анализ показал, что отмеченные выше разработанные ранее средства поверки магнитных толщиномеров покрытий уже не удовлетворяют современным требованиям, находящиеся в эксплуатации уже изношены, а новые не выпускаются, поэтому необходимо разработать средства поверки, обеспечивающие воспроизведение и передачу размера толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм с погрешностью в три раза меньше, чем пределы допускаемой погрешности магнитных толщиномеров покрытий.

Многолетний положительный опыт поверки толщиномеров покрытий показал, что оптимальными средствами поверки являются меры толщины покрытий ступенчатой конструкции, которые положены в основу действующей в РФ системы метрологического обеспечения измерений толщины покрытий и были стандартизованы (ГОСТ 25177-82).

В работе показано, что такая конструкция может быть принята за основу при разработке необходимых средств поверки.

При разработке новых мер толщины покрытий принято во внимание, что принцип действия магнитных толщиномеров заключается в измерении изменения магнитного поля (или магнитного сопротивления), возникающего между преобразователем толщиномера покрытий и ферромагнитным изделием. Это изменение функционально связано с толщиной покрытия (немагнитным зазором между преобразователем и ферромагнитным основанием). Исходя из принципа действия, очевидно, что в качестве немагнитного зазора может выступать любой немагнитный материал, в том числе и комбинация немагнитных материалов.

Анализом литературы выявлено 19 основных влияющих факторов, проанализирована их значимость и показано, что наибольший вклад в суммарную погрешность меры вносят геометрические и физико-механические характеристики объекта измерений.

Во второй главе проведен теоретический анализ погрешности мер толщины покрытий. Исследована параметрическая модель формирования покрытия на ступенчатой мере и формальная модель толщины покрытия, учитывающая реальные условия, возникающие при формировании покрытия на основании.

Для ступенчатой конструкции мер толщины покрытий размер толщины покрытия в любой точке, в соответствии с определением, приведенным ГОСТ 8.362-79, описывается выражением:

$$h = \min_{\pm\Delta x, \pm\Delta y} \sqrt{[f_p(x_p, y_p) - f_o(x, y)]^2 + (x_p - x)^2 + (y_p - y)^2} = \varphi(x, y)$$

Толщина покрытия представляет собой случайную величину в каждой точке покрытия, поэтому в мерах следует нормировать среднее значение толщины покрытия на рабочем участке, для которого справедливо выражение:

$$\bar{h} = \frac{1}{(x_b - x_a)(y_b - y_a)} \int_{x_a}^{x_b} \int_{y_a}^{y_b} \varphi(x, y) dx dy$$

где \bar{h} среднее арифметическое значение толщины покрытия на заданной площади.

В работе показано, что на определение размера толщины покрытия в реальных условиях влияет шероховатость поверхности покрытия и основания. В этом случае для формальной модели толщины покрытия можно рассматривать величины: $h_{н\bar{o}} = h_m + h_n + h_o = R_{t,n} + R_{t,o} + h_m$, $h_{нм} = h_m$, $h_{cp} = h_m + 0,5(R_{t,n} + R_{t,o})$, где $h_{н\bar{o}}$, $h_{нм}$ и h_{cp} – соответственно наибольшая, наименьшая и средняя толщина покрытия, $R_{t,п.}$ – зона шероховатости поверхности покрытия, равная расстоянию между линиями выступов и впадин микронеровностей, что соответствует параметру шероховатости $R_{t,п.}$, $R_{t,o}$ – зона ше-

роховатости поверхности основания, равная соответственно параметру шероховатости $R_{t,o}$, h_m – промежуточная зона материала покрытия.

Таким образом, в реальных условиях шероховатость поверхности покрытия сильно влияет на точность определения действительной толщины покрытия. Одним из условий повышения точности мер толщины покрытий является минимизация параметров $R_{t,p}$ и $R_{t,o}$.

В соответствии с критерием ничтожных погрешностей, условие, при котором можно пренебречь влиянием параметров шероховатости $R_{t,p}$, $R_{t,o}$ определяется выражением:

$$\Delta < 0,15(R_{t,p} + R_{t,o})$$

где Δ – требуемая допускаемая погрешность измерения толщины.

Для разрабатываемой ступенчатой конструкции меры (рис. 1) это условие должно быть выдержано.

Методика измерений ступенчатой меры (МИ 1903-97) с помощью профилографа дает возможность получать профилограмму в виде, показанном на рис. 3.

По профилограмме, толщина в произвольной точке покрытия определяется как перпендикуляр, проведенный от данной точки до поверхности основания. Как видно, основание находится под покрытием, поэтому при измерении h_i используется экстраполированная линия, проведенная относительно непокрытой части основания. В этом случае формула измерения толщины покрытия в i -ой точке имеет вид:

$$h_i = N \cdot a \pm \Delta,$$

где N – число делений на профилограмме, a – цена деления, Δ – погрешность от действия влияющих величин.

Анализ конструкции ступенчатой меры толщины покрытия и методики ее измерения показал, что основными составляющими погрешности меры являются: а) геометрические составляющие: погрешность из-за отклонения от плоскостности основания $\Delta_{пл}$, погрешность от неравномерности толщины покрытия $\Delta_{нп}$, погрешность из-за шероховатости поверхности покрытия и

основания $\Delta_{ш}$, б) физико-механические составляющие: погрешность от контакта щупа с покрытием $\Delta_{к}$, погрешности от диффузии материала покрытия и основания $\Delta_{д}$, в) составляющие погрешности, связанные со средством измерений: инструментальная погрешность профилометра $\Delta_{и}$, погрешность из-за недоощупывания микронеровностей поверхности покрытия $\Delta_{щ}$, г) составляющие погрешности, связанные с условиями измерений: погрешность отсчета оператора $\Delta_{оп}$, погрешность от влияния температуры окружающей среды $\Delta_{Т}$.

В общем виде имеем: $\Delta_{м} = f(\Delta_{пл}, \Delta_{нп}, \Delta_{ш}, \Delta_{к}, \Delta_{д}, \Delta_{и}, \Delta_{щ}, \Delta_{оп}, \Delta_{Т})$.

В диссертации показано, что с учетом критерия ничтожных погрешностей влиянием составляющих погрешности $\Delta_{к}, \Delta_{д}, \Delta_{щ}, \Delta_{оп}, \Delta_{Т}$ можно пренебречь.

Тогда можно написать: $h_i = N \cdot a \pm \Delta_{nl} \pm \Delta_{ш} \pm \Delta_{и} \pm \Delta_{у}$.

Составляющие погрешности $\Delta_{нп}, \Delta_{ш}, \Delta_{и}$ войдут в результат измерений $h_{ср}$ и будут учтены при оценке СКО.

В этом случае размер толщины покрытия, воспроизводимый мерой, имеет вид: $h_{ср} = \frac{\sum h_i}{n} \pm \Delta_{nl} \pm t\sigma$, где σ – СКО среднего арифметического результата измерений, t – коэффициент Стьюдента, принятый для вероятности $P=0,95$, n – число измерений.

Погрешность меры можно оценить выражением: $\Delta_{м} = \sqrt{\Delta_{nl}^2 + (t \cdot \sigma)^2}$.

Условием уменьшения погрешности меры будет минимизация отклонения от плоскостности поверхности основания, шероховатости поверхности покрытия и неравномерности толщины покрытия, а также повышение точности измерений.

Исследования возможности реализации этого условия приведены в диссертации.

В третьей главе описана методика измерений мер толщины покрытий и приведены результаты экспериментальных исследований при их разработке.

В связи с тем, что получение на мере немагнитного покрытия толщиной до 20000 мкм чрезвычайно сложно и экономически не выгодно, целесообразно разбить весь диапазон толщины покрытий L на два поддиапазона: $L = L_1 + L_2$.

Проведенные технико-экономический анализ и экспериментальные исследования материалов и технологий показали, что для диапазона $0 < L_1 < 500$ мкм целесообразно воспроизводить размер толщины покрытий натурными мерами толщины покрытий, а в диапазоне $500 \leq L_2 \leq 20000$ мкм - имитаторами толщины покрытий.

Анализ показал, что для имитаторов толщины целесообразно использовать кварцевое стекло, которое обладает хорошей обрабатываемостью, высокой твердостью, позволяет получить отклонение от плоскостности в сотые доли мкм, а плоские образцы можно измерить с высокой точностью.

Для имитаторов принята конструкция в виде цилиндра диаметром 20 мм и толщиной: 500, 750, 1000, 1500, 2000, 5000, 10000, 20000 мкм. Обладая хорошей прилегаемостью, при условии высокой плоскостности, комбинацией имитаторов из этого набора можно получить разную суммарную толщину, необходимую для поверки толщиномера. Пределы допускаемой погрешности имитаторов составили $\pm 1\%$.

При выборе материалов покрытия натуральных мер было учтено, что одной из основных характеристик меры является долговечность. Анализ значений твердости различных материалов, используемых для покрытий, показал, что наиболее износостойким является хром. Но в связи с тем, что нанесение толстого слоя хрома технологически сложно и из-за внутренних напряжений он может растрескиваться, было принято решение для улучшения технических свойств мер применять двухслойное покрытие. Первым, примыкающим к основанию слоем, принята медь, а вторым дополнительным упрочняющим слоем – хром. В сумме они воспроизводят размер толщины покрытий в диапазоне $0 < L_1 < 500$ мкм

Выбор толщины дополнительного покрытия хрома на меди проведен из допущения, что, при заданном измерительном усилии наконечника толщиномера $P \leq 70$ сН и радиусе сферы наконечника $r = 1$ мм, глубина напряженного участка под наконечником на дополнительном тонком покрытии хрома и в толстослойном покрытии хрома должна быть одинаковой. Расчеты показали, что для принятых условий толщина дополнительного покрытия хрома на меди должна быть не менее 1 мкм. Таким образом, в суммарной толщине двухслойного покрытия остальную часть составит медное покрытие.

Такое двухслойное покрытие на мерах предложено впервые, является немагнитным и отвечает условию поверки магнитных толщиномеров.

На рисунке 1 представлена схема разработанной меры толщины покрытия.

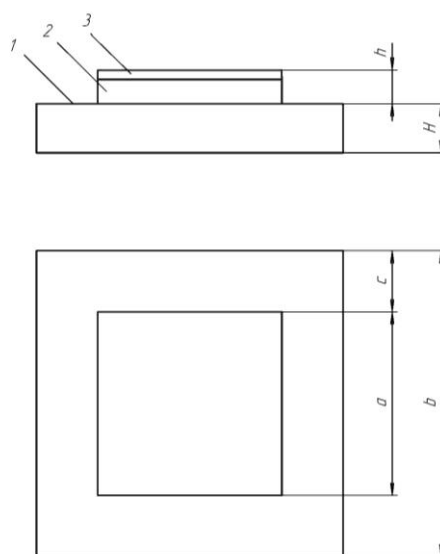


Рис. 1. схема меры толщины покрытий.

1 – основание меры, 2 – покрытие из меди, 3 – покрытие из хрома.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований разработанных мер толщины покрытий.

Экспериментальные исследования покрытий на мерах, полученных без сглаживания, показали, что параметр шероховатости поверхности покрытия R_a составляет от 0,03 до 1,0 мкм, а параметр R_z от 0,3 до 6,0 мкм (в зависимости от толщины покрытия на мере). Эти значения удовлетворяют

условию применения толщиномеров покрытия, для которых пределы допускаемой основной погрешности нормируются при значениях шероховатости поверхности покрытия $Rz=20$ мкм, однако для точных измерений мер необходима их минимизация.

Исследования неравномерности толщины покрытия на мере показаны на рис. 2 в виде графика зависимости относительной неравномерности толщины покрытия от толщины. Показано, что чем меньше нормируемая площадь, на которой определяется средняя толщина покрытия, тем меньше неравномерность покрытия.

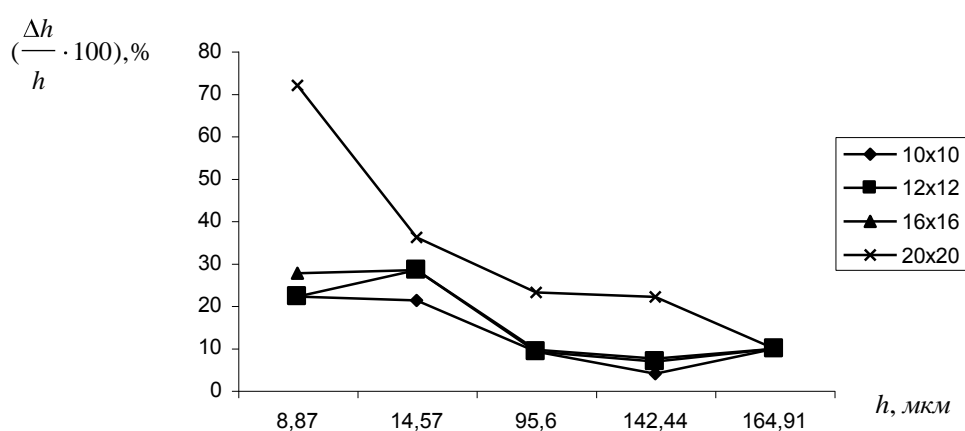


Рис. 2. График зависимости относительной неравномерности толщины покрытия от толщины.

С целью уменьшения влияния неравномерности толщины покрытия и локальных выступов неровностей поверхности покрытия на суммарную погрешность меры, при изготовлении мер применено выравнивание неравномерности покрытия способом механического сглаживания притиркой. Это дало положительный эффект, который отчетливо виден на рис. 3 а и б, где показан профиль поверхности покрытия до и после сглаживания соответственно.

Эта технология позволила уменьшить выступы неровностей покрытия на мере более чем в 11 раз, уменьшить погрешность меры от 2-х до 13-ти раз и увеличить рабочую площадку на мере в 2 раза.

Taylor Hobson

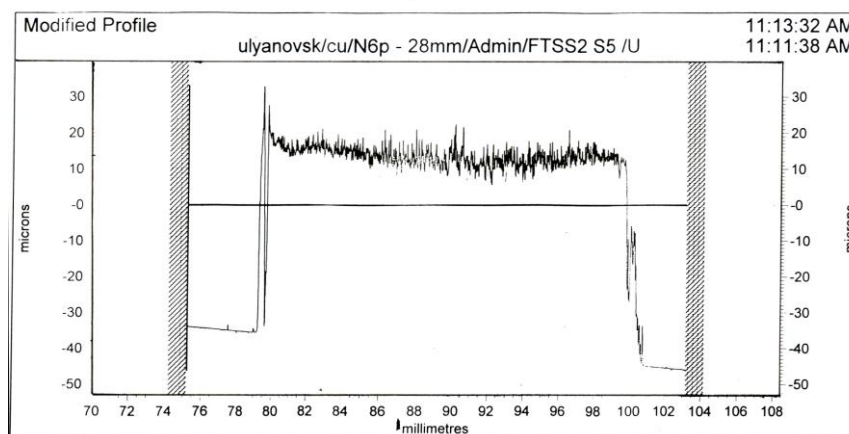


Рис. 3 а. Профиль поверхности покрытия до сглаживания.

Taylor Hobson

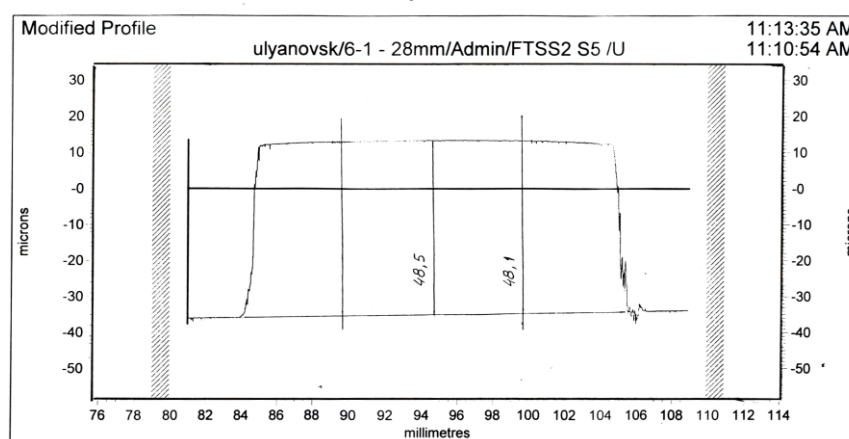


Рис. 3 б. Профиль поверхности покрытия после сглаживания.

Исследования показали, что в суммарной погрешности мер достаточно учитывать составляющие погрешности вызванные отклонением от плоскостности поверхности основания $\Delta_{nl} = \pm 0,08$ мкм, неравномерностью покрытия по толщине $\Delta_{nn} = \pm 0,2$ мкм и погрешностью средства измерения $\Delta_{и} \leq 0,01\% h$.

В четвертой главе рассмотрен способ минимизации влияния нестабильности магнитных свойств оснований в наборе мер на погрешность поверки толщиномеров. Показано, что влияние коэрцитивной силы H_c на погрешность уменьшается при увеличении толщины покрытия. В связи с этим предложен новый подход в подборе материалов оснований в наборе, по которому при упорядочении материалов магнитных оснований в наборе для малых значений толщины надо брать материал, для которого H_c больше или

равно 1,9, т. е. сталь 20. Для более толстых покрытий можно брать материал, для которого H_c больше 1,9, например, сталь 30 и т.д.

На изложенный подход получено положительное решение на изобретение № 2006115986/28 от 29.03.2006 г.

С учетом изложенного подхода был изготовлен и исследован комбинированный набор мер толщины двухслойных покрытий медь+хром на стали (диапазон толщин покрытий в наборе от 5,51 до 199,47 мкм).

На рис. 4 показаны графики погрешности мер толщины покрытий (сплошная линия) и толщиномера (пунктирная линия). По графику видно, что действительная погрешность мер в наборе в 3 - 6 раз меньше погрешности толщиномера, что удовлетворяет требованиям соотношения погрешностей при поверке.

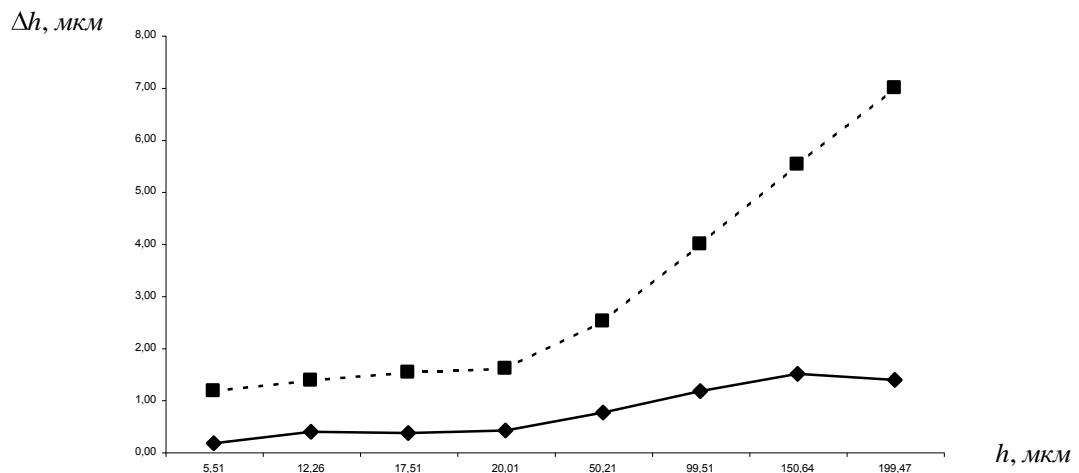


Рис. 4 График погрешностей мер толщины покрытий (сплошная линия) и толщиномеров (пунктирная линия).

В работе приведены результаты исследований набора мер толщины покрытий медь+хром на стали, эксплуатируемого в ФГУ «Урал-Тест» с 2000 г. с интенсивностью порядка 70 поверяемых толщиномеров в год.

На рис. 5 показан график изменения погрешности мер, который показывает, что погрешность мер в течение 5 лет эксплуатации практически не меняется, а изменения толщины и шероховатости поверхности покрытий имеют случайный характер в пределах погрешности измерений. Это

подтверждает хорошую износостойкость мер и целесообразность выбора двухслойного покрытия медь+хром.

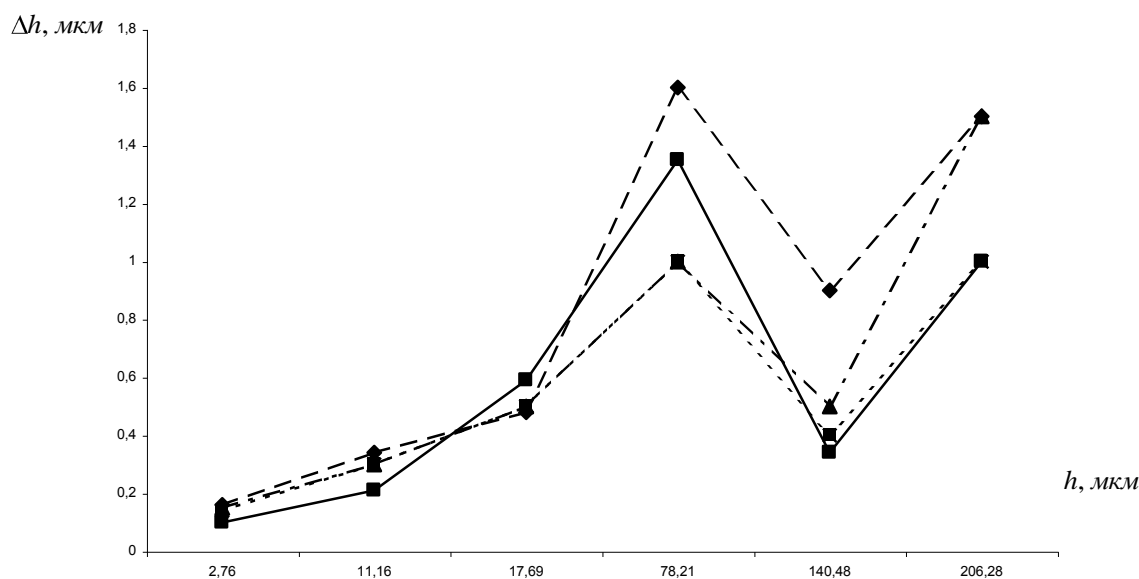


Рис. 5. График погрешности набора мер толщины покрытий медь+хром на стали по результатам поверки за 2000 – 2005 гг.

В диссертации приведены результаты разработки технологии изготовления трубчатых мер. По разработанной технологии изготовлены макетные образцы трубочек малого диаметра менее 2 мм.

В соответствии с предложенным способом, толщина стенки трубочки определяется по формуле: $h = \frac{d_n - d_{np}}{2}$, где d_n наружный диаметр медного покрытия на проволочке, d_{np} - наружный диаметр калиброванной проволочки.

Погрешность измерений толщины стенки трубочки определяется выражением

$\Delta h = \frac{\sqrt{\Delta d_n^2 + \Delta d_{np}^2}}{2}$ и составляет $\pm 0,8\%$. Показано, что примененный способ

измерения трубочек малого диаметра предпочтительнее существующих.

Исследования подтвердили работоспособность предложенного метода, а полученные результаты могут служить основой для разработки специального эталона единицы длины в области измерений толщины покрытий в отверстиях диаметром от 1 до 2 мм с ожидаемой относительной погрешностью 0,8%.

В диссертации показана разработанная нами принципиальная схема специального эталона единицы длины в области измерений толщины покрытий в отверстиях, который состоит из: эталонного набора мер толщины покрытий трубчатых, эталонной установки для измерений наружного диаметра проволочек «Микрон 010 П», эталонного толщиномера ИНТРОМЕТ ИТМ-52, ПК – блока обработки и хранения информации.

В пятой главе представлены разработанные на основании полученных результатов нормативные документы. В частности, Рекомендация по метрологии Р 50.2.006-01 «Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне толщин от 1 до 20000 мкм», а также проект ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Меры толщины покрытий эталонные. Основные параметры и общие технические требования». Проект стандарта был рассмотрен на НТС ВНИИМС, ТК 371 и разослан в более 20 организаций. Отрицательных отзывов не получено, стандарт будет представлен на утверждение в 2007 г.

В этой же главе приведены результаты разработки специального набора мер толщины покрытий хрома с подслоем никеля толщиной до 1 мкм на основании из стали и методика его измерений. Показано, что измерения особенно осложнены, когда отклонение от плоскостности поверхности основания соизмеримо с толщиной покрытия. Для такого случая разработана методика измерений толщины покрытий на мерах способом совмещения профилограмм. Данный способ показан на рис. 6 а, б, в. Разработанный способ позволил измерить меры толщины покрытий хрома на стали с подслоем никеля в диапазоне от 0,3 до 1,0 мкм с погрешностью не более 0,09 мкм.



Рис. 6 а – Профилограмма основания после нанесения подслоя никеля.

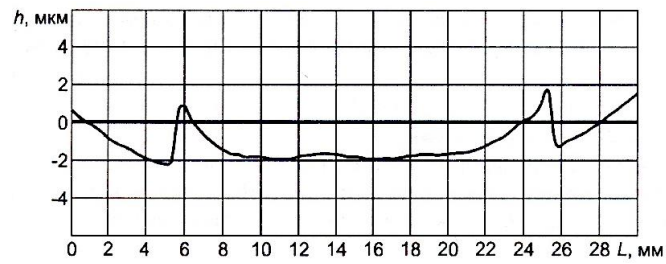


Рис. 6 б – Профилограмма покрытия хрома.



Рис. 6 в – совмещенные профилограммы.

Шестая глава посвящена внедрению результатов исследований и разработок. Разработано 26 наборов мер толщины покрытий, в том числе: комбинированный набор мер толщины покрытий медь+хром на стали с имитаторами толщины, наборы мер толщины покрытий цинка на стали, никеля на стали, меди на латуни, никеля на меди. Перечисленные наборы внедрены в 16 организациях, в том числе 6 ЦСМ.

Комбинированный набор мер толщины покрытий также внедрен во ВНИИМС, с помощью которого за период с 2000 г. проведена поверка более 400 толщиномеров покрытий.

Созданные меры толщины покрытий прошли испытания с целью утверждения типа, и результаты представлены на утверждение на НТК Ростехрегулирования.

Результаты исследований послужили основой для разработки упомянутых выше нормативно-технических документов.

Основные выводы

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- Комбинированный набор, состоящий из натуральных мер толщины двухслойных покрытий и имитаторов толщины, позволяет воспроизводить размер толщины немагнитных покрытий в диапазоне от 1 до 20 000 мкм с пределами допускаемой погрешности в 3 -6 раз меньше погрешности толщиномеров и удовлетворяет требованиям поверки толщиномеров.

- Впервые предложено для повышения технологичности и долговечности натуральных мер использовать двухслойное покрытие медь с хромом, а для имитатора толщины можно использовать кварцевое стекло.

- Положительные результаты исследований разработанных макетных образцов трубочек малого диаметра, позволили создать предпосылки для разработки эталонных мер толщины покрытий трубчатых для передачи размера единицы длины толщиномеров покрытий в отверстиях малого диаметра.

- Предложенный расчетно-профилографический способ позволил измерять толщину особо тонких покрытий на мерах со значимым отклонением плоскостности поверхности основания с погрешностью не более 0,08 мкм.

- Результаты исследований использованы при разработке Р 50.2.006-2001 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20 000 мкм» и проекта стандарта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Меры толщины покрытий. Основные параметры и общие технические требования».

Можно заключить, что поставленные перед диссертантом цели и задачи исследований выполнены.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Меры толщины покрытий для магнитных толщиномеров; Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л., Измерительная техника. 1999, №6, с.33.
2. Комбинированный набор мер толщины покрытий для магнитных толщиномеров; Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л., Измерительная техника, №12, 2001, с.30.
3. Р 50.2.006-2001 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм, ИПК. Издательство стандартов. М., 2001.
4. Меры толщины тонких покрытий и их измерение методом совмещения профилограмм, Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л., Измерительная техника. , №4, 2003, с.10.
5. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий. Теория и практика. Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л., ИПК. Издательство стандартов. М., 2004.
6. Научно-техническая конференция «Молодые метрологи – народному хозяйству», тезисы доклада: "О сертификации и поверке средств неразрушающего контроля", г. Москва, 1999 г.
7. 15-я Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», тезисы доклада: "Методика поверки мер толщины покрытий",
8. 15-я Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика» тезисы доклада "О сертификации и поверке средств неразрушающего контроля", г. Москва, 1999 г.
9. 15-я Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика» тезисы доклада "Меры толщины покрытий для магнитных толщиномеров", г. Москва, 1999 г.
10. 3-я Международная конференция «Диагностика трубопроводов», тезисы доклада: Государственная поверочная схема для толщиномеров покрытий, г. Москва, 2001 г.

11. Международная специализированная выставка «Промышленный неразрушающий контроль» Конференция «Использование технологий промышленного неразрушающего контроля для повышения безопасности и надежности промышленных объектов», тезисы доклада: Новые разработки для метрологического обеспечения магнитных толщиномеров покрытий», г. Москва, 2002 г.
12. Положительное решение по заявке на изобретение №2006115986/28 «Набор мер толщины покрытий для поверки магнитных толщиномеров», авторы Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л., 2006 г.