

На правах рукописи



Гаврилова Оксана Алексеевна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ МАГНИТНЫМИ
ТОЛЩИНОМЕРАМИ**

2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Секацкий Виктор Степанович

Официальные оппоненты: **Данилевич Сергей Борисович**
доктор технических наук, доцент
Новосибирский филиал Федерального государственного автономного образовательного учреждения дополнительного профессионального образования «Академия стандартизации, метрологии и сертификации (учебная)», кафедра «Стандартизация, сертификация и менеджмент качества», профессор

Гольдштейн Александр Ефремович
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение контроля и диагностики, профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет»

Защита состоится 16 июня 2023 года в 14:00 ч. на заседании диссертационного совета 24.2.404.05, созданного на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», по адресу; 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. УЛК 112.

С диссертационной работой можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кайзер Юрий Филиппович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Покрытия применяются при производстве продукции машиностроения, авиастроения, медицинского оборудования и других сфер экономики для придания поверхностям изделий коррозионной стойкости, износостойкости, декоративных и других свойств.

Эксплуатационный ресурс изделий, имеющих покрытия, оценивается рядом функциональных параметров, одним из которых является толщина покрытий.

В настоящее время нормирование толщины покрытий заключается в назначении её минимально необходимого значения исходя из технологических возможностей или эксплуатационной необходимости, нормирование верхнего предела толщины покрытий не регламентировано. Отсутствие системы допусков на толщину покрытий приводит к перерасходу материалов и энергии в технологических процессах нанесения покрытий и не позволяет осуществлять выбор средств измерений толщины покрытий в зависимости от точности.

Для контроля толщины немагнитных покрытий на магнитном основании наибольшее применение находят магнитные толщиномеры. Достоверность результатов контроля определяется подтверждением пригодности метрологического обеспечения толщины покрытий магнитными толщиномерами.

Таким образом, совершенствование элементов и процессов метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами, способствующих увеличению достоверности оценки эксплуатационного ресурса контролируемых изделий, является актуальным направлением научного исследования, имеющим важное значение для развития метрологии.

Степень разработанности темы. Требования к покрытиям установлены в межгосударственных стандартах серии «Единая система защиты от коррозии и старения», регламентирующих минимальное значение толщины покрытия, которое должно обеспечивать защитную способность покрытия и определенный эксплуатационный ресурс изделий. Необходимость нормирования и максимального значения толщины покрытия изложена в работах Бабаджанова Л.С., Гелашвили Н.В., Муджирии Я.Н. и других. Однако, предложения по решению данной задачи не выявлены.

Большая часть научно-исследовательских работ и патентов направлены на создание новых методов и средств контроля толщины покрытий отечественными и зарубежными производителями. Значительный вклад в развитие электромагнитных методов неразрушающего контроля внесли: Горкунов Э.С., Дорофеев А.Л., Ефимов А.Г., Ключев В.В., Бабаджанов Л.С., Бабаджанова М.Л., Потапов А.И., Сясько В.А., Ивкин А.Е. и другие ученые. Однако, исследования регламентированных ГОСТ

31993-2013 факторов, которые влияют на точность измерения толщины покрытия, не выявлены.

Цель диссертационной работы – совершенствование элементов и процессов метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами, способствующих увеличению достоверности оценки эксплуатационного ресурса контролируемых изделий.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие подходы к контролю толщины покрытий и разработать методику определения допусков на толщину покрытий, нормирующую минимальное и максимальное значения толщины покрытия.

2. Обосновать и предложить изменения в методику поверки магнитных толщиномеров по расчёту их погрешностей.

3. Провести оценку основных метрологических характеристик (диапазонов измерений и погрешности) магнитных толщиномеров покрытий и разработать рекомендации по их нормированию.

4. Исследовать влияние толщины основания, краевого эффекта и радиуса кривизны контролируемых изделий на погрешность магнитных толщиномеров и разработать практические рекомендации по её снижению.

Объект исследования – магнитные толщиномеры для контроля толщины немагнитных покрытий на магнитном основании.

Предмет исследования – элементы и процессы метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами.

Методы исследования. При решении поставленных задач применялись методы анализа и обобщения теоретических и практических материалов, научных трудов, а также нормативных правовых актов и нормативных документов по исследуемой проблеме, методы планирования эксперимента по проверке погрешности толщиномеров, методы математической статистики для обработки экспериментальных данных, метод интерполяции экспериментально полученных точек.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, полученных лично автором, подтверждается теоретически и экспериментально. Научные положения аргументированы, теоретические результаты работы и выводы подтверждены проведенными экспериментальными исследованиями и их математической обработкой.

На защиту выносятся:

1. Методика определения допусков на толщину покрытий.

2. Предложения, вносимые в методику поверки по расчёту погрешностей магнитных толщиномеров.

3. Результаты исследования диапазонов контроля и погрешности магнитных толщиномеров и практические рекомендации по их нормированию.

4. Результаты исследования влияния параметров, ограничивающих область применения магнитных толщиномеров, на их погрешность и практические рекомендации по снижению погрешности.

Научная новизна работы:

1. Впервые разработана методика определения допусков на толщину покрытий, позволяющая нормировать минимальную и максимальную толщину покрытий, что способствует повышению достоверности оценки эксплуатационного ресурса контролируемых изделий.

2. Расчётным и экспериментальным путём обоснованы изменения и дополнения в методику поверки магнитных толщиномеров, учитывающие в отличие от известных методик поверки случайную составляющую основной погрешности, что способствует повышению достоверности оценки результатов поверки магнитных толщиномеров.

3. Впервые разработана методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров на основе результатов исследования диапазонов контроля и погрешности магнитных толщиномеров, позволяющая оценивать и корректировать метрологические характеристики на стадии проектирования, изготовления, испытания типа средств измерений, поверки (калибровки) и эксплуатации магнитных толщиномеров, что способствует обеспечению достоверности измерительной информации.

4. Впервые экспериментально установлены зависимости погрешностей магнитных толщиномеров от параметров, ограничивающих область их применения (толщина основания, краевой эффект, радиус кривизны поверхности), которые позволяют снизить погрешность измерения магнитными толщиномерами.

Теоретическая и практическая значимость работы. Внедрение предложенной системы допусков покрытий позволяет системно нормировать точность толщины покрытий в нормативной документации, осуществлять выбор толщиномеров по точности и эффективно решать практические задачи при изготовлении и контроле толщины покрытий, устанавливать требования к показателям качества толщиномеров.

Совершенствованная методика поверки магнитных толщиномеров способствует повышению достоверности оценки результатов.

Разработанная методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров позволяет снизить погрешность измерения.

Предложенные методики прошли апробацию в учебном процессе ФГАОУ ВО СФУ и при практическом использовании в АО «НПП «Радиосвязь»», в ФБУ

«Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты работы докладывались на Международной молодежной научно-практической конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование» (Красноярск, 2017, 2018 гг.); Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы сертификации, управления качеством и документационного обеспечения управления» (Красноярск, 2018, 2021 гг.).

Тема и содержание диссертационной работы соответствует п. 5 паспорта научной специальности 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 4 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 – в базе SCOPUS, 2 – в базе Web of Science, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 128 наименований, и 5 приложений. Работа изложена на 178 листах машинописного текста, содержит 55 рисунков, 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель работы, поставлены задачи для её достижения, определены объект и предмет исследования, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость проведенных исследований, приведены методы исследования, представлены сведения об апробации результатов исследования.

В первой главе показана актуальность применения покрытий для придания поверхностям изделий коррозионной стойкости, износостойкости, декоративных и других свойств. Выявлено, что одним из основных показателей качества покрытия является его толщина.

Проведенный анализ показал, что наибольшее применение находят магнитные методы неразрушающего контроля толщины покрытий, поэтому такие толщиномеры покрытий приняты в качестве объекта для дальнейших исследований.

На основе анализа метрологического обеспечения измерений толщины покрытий выявлено, что средства измерений, вспомогательные средства, методики поверки требуют дополнительных исследований (рисунок 1).



Рисунок 1 – Структура метрологического обеспечения измерений

Предложен структурированный минимально необходимый набор нормируемых метрологических характеристик магнитных толщиномеров покрытий, который обеспечит потребителю возможность объективного выбора прибора в зависимости от необходимых эксплуатационных и точностных показателей.

Во второй главе проведен анализ литературы, регламентирующей толщину покрытий, который позволил выявить диапазон толщин покрытий.

Проведен анализ нормирования точности линейных размеров и геометрических отклонений поверхностей, определены принципы формирования системы допусков на толщину покрытий.

Разработана система допусков на толщину покрытий на основе следующих принципов:

1. Принцип предпочтительности, назначение которого состоит в создании необходимого разнообразия стандартных решений при ограничении использования их номенклатуры. При нормировании толщин покрытий и допусков принят ряд R10.

2. Температурный режим: стандартные допуски и требования к точности изготовления в конструкторской документации устанавливаются для нормальной температуры, нормированной ГОСТ 8.050-73.

3. Установление уровней относительной точности. В системе допусков на толщину покрытий предлагается установить 5 степеней точности. Числовые значения допусков на толщину покрытий составляют: для первой степени точности 10 % от толщины покрытия по середине интервала, для второй степени – 16 %, для третьей – 25 %, для четвертой – 40 % и для пятой – 60 %. Следовательно, количество единиц допуска «а», по аналогии с системой допусков на линейные размеры, будет соответствовать значениям, приведенным в последней строке таблицы 1.

4. Наличие интервалов номинальных значений толщины покрытий. Анализ показал, что большинство видов покрытий и изделий с такими покрытиями имеют

толщину покрытий от 1 до 300 мкм, только ряд драгоценных металлов и их сплавов - менее 1 мкм. Большие толщины встречаются крайне редко и могут достигать 8 мм. С учетом опережающей стандартизации принимаем диапазон толщины покрытия от 0,1 до 10000 мкм. Для построения интервалов номинальных значений толщины покрытий принимаем ряд R5 (таблица 1).

Таблица 1 – Допуски на толщину покрытий

Интервалы номинальных значений толщины покрытий, мкм	Степени точности				
	1	2	3	4	5
	Допуск на толщину покрытия, мкм				
До 1	0,08	0,12	0,2	0,3	0,5
Свыше 1 до 1,6	0,12	0,2	0,3	0,5	0,8
Свыше 1,6 до 2,5	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2
Свыше 2,5 до 4,0	0,3	0,5	0,8	1,2	2
Свыше 4,0 до 6,0	0,5	0,8	1,2	2	3
Свыше 6,0 до 10	0,8	1,2	2	3	5
Свыше 10 до 16	1,2	2	3	5	8
Свыше 16 до 25	2	3	5	8	12
Свыше 25 до 40	3	5	8	12	20
Свыше 40 до 60	5	8	12	20	30
Свыше 60 до 100	8	12	20	30	50
Свыше 100 до 160	12	20	30	50	80
Свыше 160 до 250	20	30	50	80	120
Свыше 250 до 400	30	50	80	120	200
Свыше 400 до 600	50	80	120	200	300
Свыше 600 до 1000	80	120	200	300	500
Свыше 1000 до 1600	120	200	300	500	800
Свыше 1600 до 2500	200	300	500	800	1200
Свыше 2500 до 4000	300	500	800	1200	2000
Свыше 4000 до 6000	500	800	1200	2000	3000
Свыше 6000 до 10000	800	1200	2000	3000	5000
Количество единиц допуска a	0,1	0,16	0,25	0,4	0,6

5. Формирование стандартных допусков толщины покрытий. В предлагаемой системе допусков на толщину покрытий значения допусков T определены на пересечении интервалов номинальных значений толщины покрытий и степени точности и рассчитаны по формуле $T=a \cdot i$. Значения допусков на толщину покрытий округлены до ближайших значений из ряда R10 и сведены в таблицу 1.

6. Нормирование поля допуска. При разработке системы допусков на толщину покрытия предлагается за номинальное значение толщины покрытия принять ее минимальную величину, которая указывается в технической документации и при обозначении покрытия. Поле допуска на толщины расположить относительно номинального размера односторонне в плюс (рисунок 2).

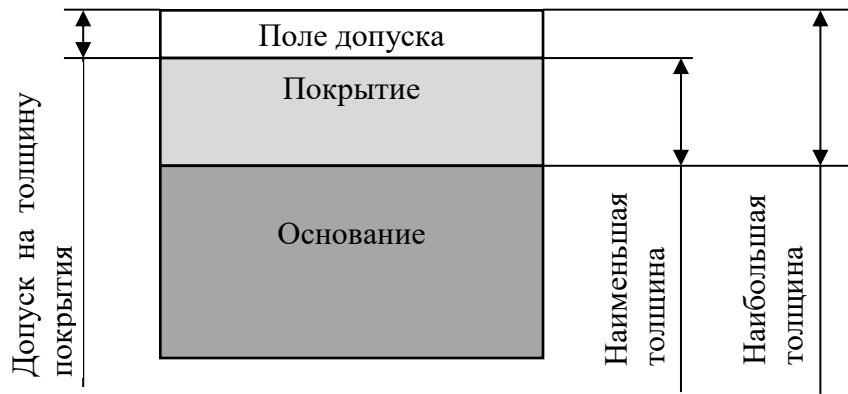


Рисунок 2 – Схема расположения поля допуска на толщину покрытия

Разработана методика определения допусков на толщину покрытий, позволяющая нормировать минимальную и максимальную толщину покрытий, что способствует повышению достоверности оценки эксплуатационного ресурса контролируемых изделий.

Проведён анализ действующих методик поверки магнитных толщиномеров, который выявил несоответствия при определении основной погрешности и её составляющих (рисунок 3).

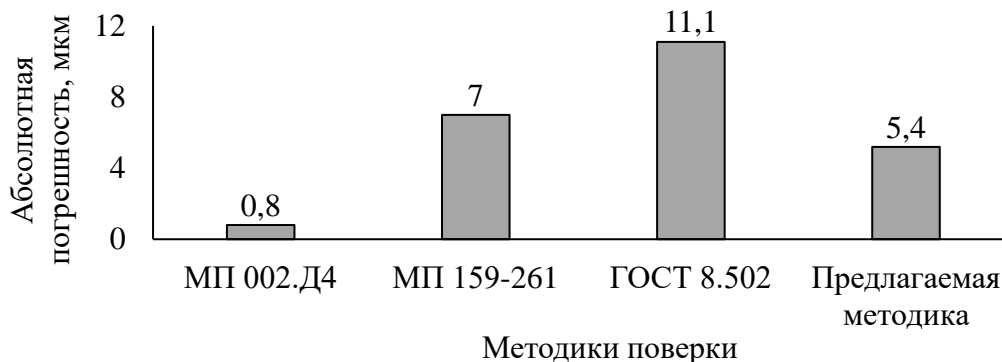


Рисунок 3 – Сравнение методик поверки толщиномеров

Предложены изменения в ГОСТ 8.502-84 по расчёту основной погрешности толщиномеров при поверке, учитывающие случайную составляющую основной погрешности, и по включению в поверку мер толщины, прилагаемых в комплект толщиномера, что способствует повышению достоверности оценки результатов поверки магнитных толщиномеров.

В третьей главе проведен анализ погрешности и диапазона измерений магнитных толщиномеров. Исследования эксплуатационной документации показали, что 43 из 63 анализируемых толщиномеров имеют разные неповторяемые диапазоны измерений, что не позволяет выстроить линейку (ряд) стандартных диапазонов, позволяющих унифицировать выпуск приборов. Фиксированное и минимально

необходимое количество диапазонов измерений можно обеспечить только за счет создания стандартов на технические требования или общие технические требования магнитных толщиномеров покрытий.

Кроме того, необходимо отметить, что половина из анализируемых толщиномеров имеют диапазон измерения, который начинается с нуля, а погрешность задается выражением, отличным от нуля (например, $\pm (2+0,02h)$, где h – толщина покрытия).

Анализ нормирования погрешности толщиномеров выявил различные подходы и зависимости: линейные (рисунок 4) или ступенчатые (рисунок 5).

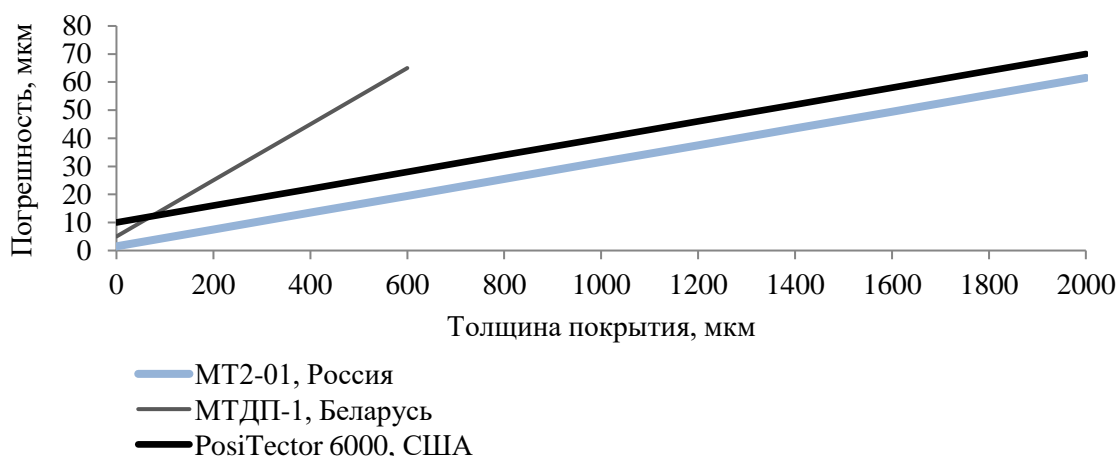


Рисунок 4 – График линейной зависимости погрешности толщиномеров от толщины покрытия во всем диапазоне измерения

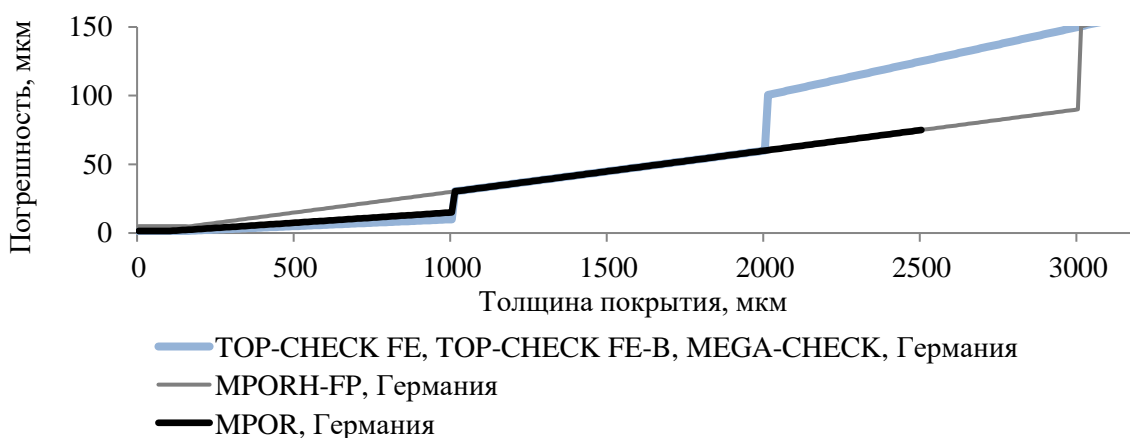


Рисунок 5 – График разбивки погрешности в пределах диапазона измерений на поддиапазоны с фиксированным значением в первом поддиапазоне

Предложена система нормирования погрешности магнитных толщиномеров в зависимости от толщины и степени точности покрытия, что позволит единообразно нормировать погрешность толщиномеров и выбирать их в зависимости от точности измерения (таблица 2).

Таблица 2 – Погрешность толщиномеров

Интервалы значений толщины покрытий, мкм	Степени точности				
	1	2	3	4	5
	Погрешность толщиномера, мкм				
До 1	0,025	0,04	0,06	0,07	0,1
Свыше 1 до 1,6	0,04	0,07	0,1	0,1	0,15
Свыше 1,6 до 2,5	0,07	0,1	0,15	0,2	0,2
Свыше 2,5 до 4,0	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Свыше 4,0 до 6,0	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
Свыше 6,0 до 10	0,25	0,4	0,6	0,7	1
Свыше 10 до 16	0,4	0,7	1	1	1,5
Свыше 16 до 25	0,7	1	1,5	2	2
Свыше 25 до 40	1	1,5	2	3	4
Свыше 40 до 60	1,5	2,5	4	5	6
Свыше 60 до 100	2,5	4	6	7	10
Свыше 100 до 160	4	7	10	10	15
Свыше 160 до 250	7	10	15	20	20
Свыше 250 до 400	10	15	20	30	40
Свыше 400 до 600	15	25	40	50	60
Свыше 600 до 1000	25	40	60	70	100
Свыше 1000 до 1600	40	70	100	100	150
Свыше 1600 до 2500	70	100	150	200	200
Свыше 2500 до 4000	100	150	200	300	400
Свыше 4000 до 6000	150	250	400	500	600
Свыше 6000 до 10000	250	400	600	700	1000
Значение погрешности K	0,35	0,35	0,30	0,25	0,20

При проведении экспериментальных исследований по оценке точности толщиномеров:

- осуществлялась проверка гипотезы о нормальном законе распределения с помощью составного критерия;

- определялась значимость влияющего при эксперименте фактора на результаты исследования с помощью элементов дисперсионного анализа;

- оценивалась погрешность толщиномеров по предложенной ранее методике.

Определен порядок проведения экспериментальных исследований магнитных толщиномеров покрытий. Показано, что оптимальным количеством измерений при нахождении действительного значения толщины покрытий или оценке погрешности толщиномеров является пять измерений. При экспериментальной проверке проводилось пять опытов по пять измерений в каждом. Показано, что распределение результатов измерений погрешности толщиномеров соответствует нормальному, а фактор (толщина измеряемого покрытия) существенно влияет на погрешность толщиномера и данные зависимы от фактора с вероятностью $P = 0,95$.

При экспериментальной оценке погрешности толщиномера ТМ-20МГ4 (рисунок б) по прилагаемому в комплекте прибора основанию выявлено, что:

- погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 при измерении толщины покрытий до 100 мкм существенно превышает допустимое значение. Следовательно, данный толщиномер можно рекомендовать для измерения толщины покрытий от 100 до 2000 мкм;

- в диапазоне от 100 до 2000 мкм наблюдается две экстремальные зоны: минимальной погрешности в районе 200 мкм толщины покрытия и максимальной – в районе 500 мкм. Первую зону можно использовать для повышения точности измерений. Во второй зоне следует переходить на двухточечную калибровку;

- для нахождения координат экстремальных значений была проведена интерполяция экспериментально полученных точек с последующим сглаживанием непрерывной кривой методом наименьших квадратов. Разработана программа расчета параметров экстремальных погрешностей магнитного толщиномера, которая зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ;

- для повышения точности толщиномера во второй экстремальной зоне проведена двухточечная калибровка прибора (нулевая калибровка и настройка прибора по мере 520 мкм). Результаты поверки показали, что двухточечная калибровка эффективна, но только в узком диапазоне от 400 до 500 мкм. Для другой толщины покрытия необходимо для настройки прибора использовать и другую меру.

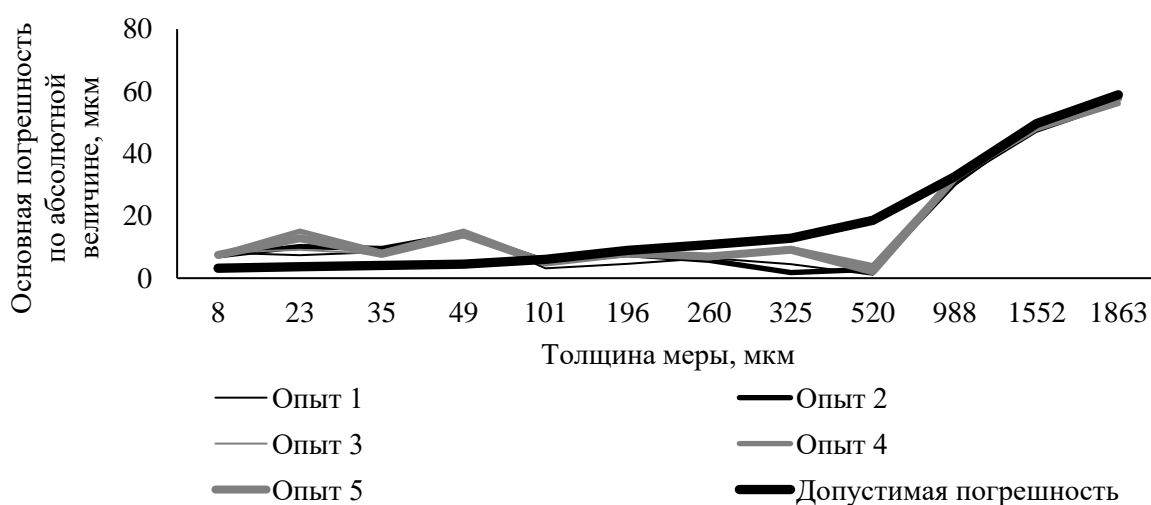


Рисунок 6 – Погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 при различной толщине мер

Сравнительные эксперименты по оценке точности толщиномеров ТТ210 и ТТ220 (рисунок 7) показали, что:

- исследуемые толщиномеры покрытий не могут обеспечить измерение толщины покрытия в заявленном в эксплуатационной документации диапазоне;

- диапазон измерений для каждой модели средств измерений толщины покрытий можно устанавливать экспериментальным путем в процессе эксплуатации. Однако, данный путь не приемлем для большей части потребителей. Следовательно,

в эксплуатационной документации необходимо указывать диапазон измерения, который обеспечит допустимую погрешность измерения толщиномером данной модели;

- в методике поверки магнитного толщиномера покрытий необходимо устанавливать предельные значения толщины эталонов покрытий, по которым оценивается погрешность толщиномера и принимается окончательное решение по результатам поверки.

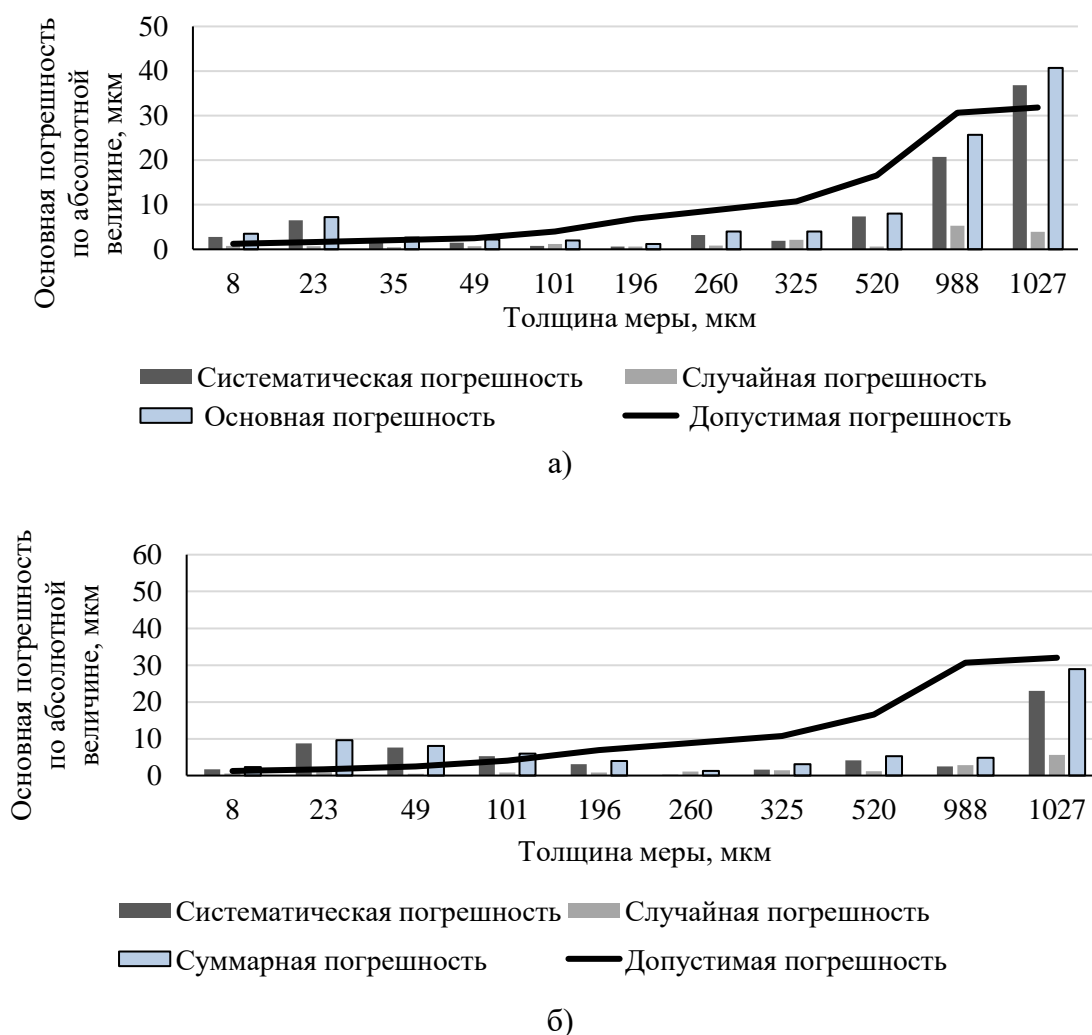


Рисунок 7 – Зависимость погрешности толщиномеров от величины меры толщины при нулевой калибровке: а) – ТТ210; б) – ТТ220

На основе результатов исследования диапазонов контроля и погрешности магнитных толщиномеров впервые разработана методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров, позволяющая оценивать и корректировать метрологические характеристики на стадии проектирования, изготовления, испытания типа средств измерений, поверки (калибровки) и эксплуатации, что способствует обеспечению достоверности измерительной информации.

В четвертой главе проведена оценка метрологических характеристик в интервале влияющих величин.

Анализ эксплуатационной документации на толщиномеры покрытий показал, что количество технических характеристик, приведенных в документации, в соотношении с количеством показателей качества, нормированных стандартом, колеблется от 27 до 59 %. Выявлено, что названия показателей качества, приведенные в ГОСТ 4.177-85, не соответствуют названиям характеристик, приведенных в эксплуатационной документации, что затрудняет сравнительный выбор потребителя.

Сравнительный анализ факторов, влияющих на точность толщиномеров, показал, что в технической документации на приборы указываются только часть факторов из рекомендованных ГОСТ 31993-2013.

При экспериментальных исследованиях проверялось влияние на погрешность толщиномеров трех основных факторов: толщина основания, краевой эффект и радиус кривизны контролируемой поверхности.

Для проведения исследований погрешности толщиномера при разной толщине оснований был изготовлен образец ступенчатой пластины, моделирующий различные толщины оснований (рисунок 8).



Рисунок 8 – Образец оснований различной толщины

Исследования проводились при нулевой калибровке толщиномера TT210 по прилагаемому основанию 5 мм (рисунок 9), а затем по каждому основанию (рисунок 10).

При нулевой калибровке по прилагаемому основанию на толщине основания 0,5, 0,7 и 1,0 мм погрешность прибора превышает допустимое значение. При калибровке прибора по каждому основанию происходит существенное снижение погрешности толщиномера.

Аналогичные зависимости погрешности средства измерений от толщины основания получены и при исследовании толщиномеров TT220: при толщине основания 0,5 и 0,7 мм погрешность толщиномера TT220 превышает допустимое значение.

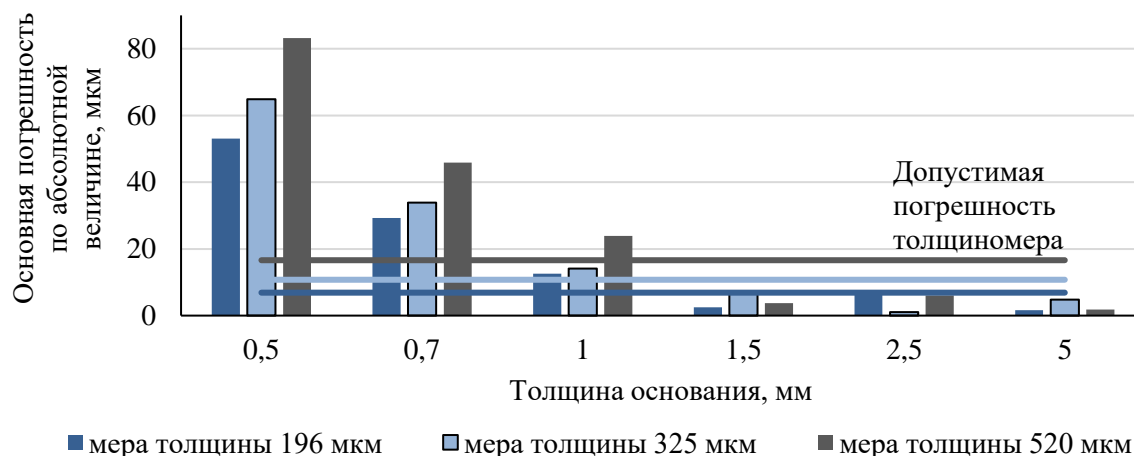


Рисунок 9 – Зависимость погрешности толщиномера ТТ210 от толщины основания при нулевой калибровке по основанию 5 мм (прилагаемое)

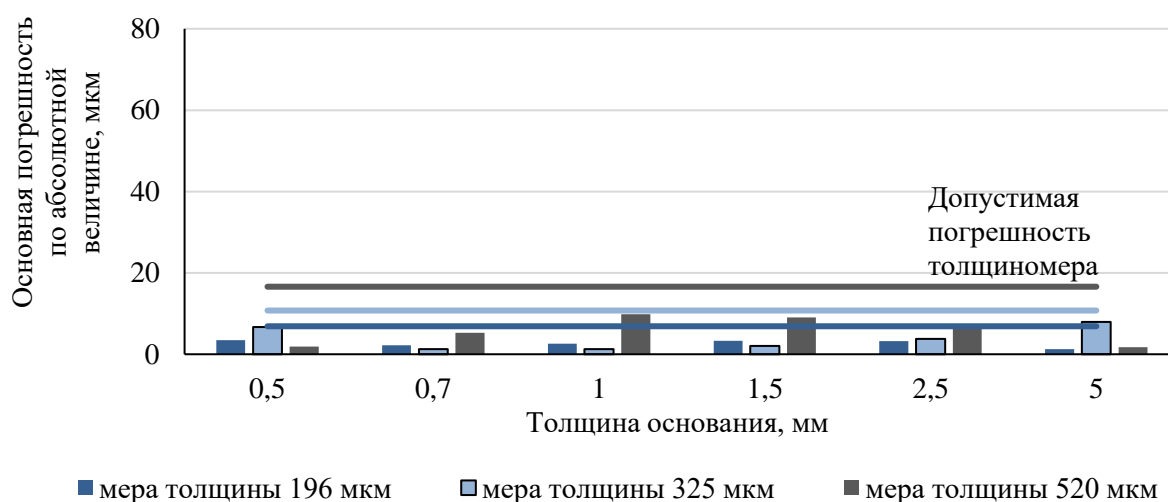


Рисунок 10 – Зависимость погрешности толщиномера ТТ210 от толщины основания при нулевой калибровке по каждому основанию

Для повышения точности измерения на тонких основаниях предлагаем в комплект прибора включать несколько оснований различной толщины. Меньшее по толщине основание должно соответствовать допустимой толщине основания, указанной в эксплуатационной документации.

Существенное влияние на погрешность толщиномера оказывает краевой эффект. Для исследования его влияния были изготовлены образцы различных диаметров (рисунок 11).

Исследования проводились при нулевой калибровке толщиномера ТТ210 по прилагаемому основанию, по большему из диаметров образцов и по каждому диаметру образцов (рисунок 12). Исследования показали, что погрешность прибора превышает допустимое значение, и чем меньше диаметр образца, тем выше погрешность.



Рисунок 11 – Образцы оснований различных диаметров

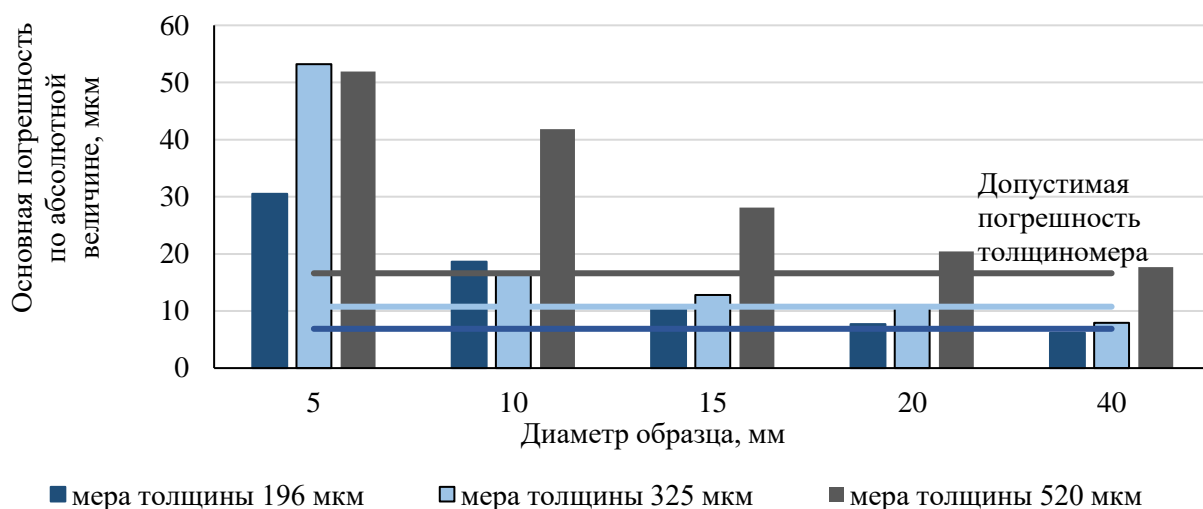


Рисунок 12 – Погрешность толщиномера TT210 при нулевой калибровке различных диаметров по каждому диаметру образца

Аналогичные зависимости погрешности средства измерения от влияния краевого эффекта получены и при исследовании толщиномера TT220.

Для исследования влияния радиуса кривизны деталей, к которым можно отнести детали цилиндрической формы или детали сложных конфигураций, был изготовлен образец, моделирующий различные радиусы кривизны (рисунок 13).

Результаты оценки погрешности толщиномера TT210 при разных диаметрах оснований показывают, что при диаметрах оснований 10, 15, 20, 30 мм погрешность прибора превышает допустимое значение (рисунок 14).



Рисунок 13 – Образцы оснований, моделирующие различные радиусы кривизны

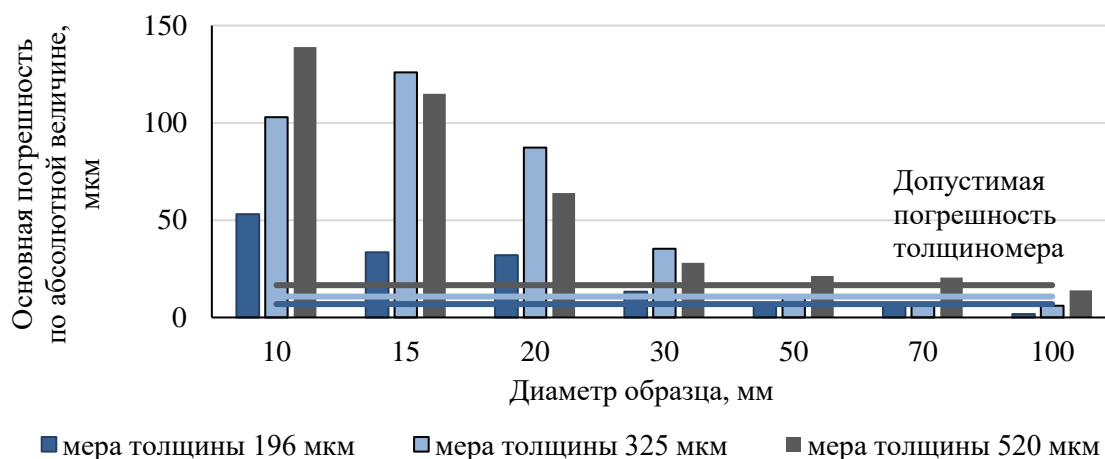


Рисунок 14 – Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм

Аналогичные зависимости погрешности средства измерения от влияния радиуса кривизны деталей получены и при исследовании толщиномера ТТ220.

Следовательно, в эксплуатационной документации толщиномеров покрытий необходимо указывать минимальный радиус (диаметр) контролируемой поверхности, при котором погрешность прибора не превышает допустимое значение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований, решена научная задача по совершенствованию метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами, способствующему увеличению достоверности оценки эксплуатационного ресурса изделий, имеющая важное значение для развития метрологии.

Основные выводы, научные и практические результаты, полученные и представленные в диссертации, заключаются в следующем:

1. При проведении исследований в области нормирования толщины покрытий разработана система допусков на толщину покрытий. При разработке системы использован принцип предпочтительности. Установлены пять уровней (степеней) относительной точности и интервалы номинальных значений толщины покрытий. Нормированы допуски на толщину покрытия и предложено одностороннее положение поля допуска, что позволяет определять минимальное и максимальное значения толщины покрытий.

Регламентирование технологических допусков на толщину покрытий приведет к существенной экономии финансовых и материальных ресурсов.

2. Установлено, что в методиках поверки толщиномеров, приведенных в ГОСТ

8.502-84 и в эксплуатационной документации, имеются ряд несоответствий и принципиальных расхождений, что приводит к недостоверности результатов поверки и, как следствие, к недостоверности результатов измерения толщины покрытий.

Предложены изменения и дополнения в методику поверки магнитных толщиномеров как элемента метрологического обеспечения контроля толщины покрытий, учитывающие в отличие от известных методик поверки случайную составляющую основной погрешности, что способствует повышению достоверности оценки результатов поверки магнитных толщиномеров.

3. Исследования показали, что для магнитных толщиномеров отсутствуют нормированные показатели по назначению основных метрологических характеристик – диапазонов измерений и погрешности прибора. Так 43 из 63 анализируемых толщиномеров покрытий имеют разные неповторяемые диапазоны измерений, что не позволяет выстроить линейку (ряд) стандартных диапазонов, позволяющих унифицировать выпуск приборов.

Выявлено, что отсутствует связь диапазона измерений с погрешностью прибора. Так в технической документации 30 толщиномеров из 63 исследуемых указан интервал измерения, который начинается с нуля, что не может обеспечить ни один толщиномер покрытий. Экспериментально установлено, что погрешность толщиномеров ТМ-20МГ4 при измерении толщины покрытий до 100 мкм существенно превышает допустимое значение. Следовательно, данный толщиномер можно рекомендовать для измерения толщины покрытий от 100 до 2000 мкм. Аналогичные результаты получены при исследовании толщиномеров ТТ210 и ТТ220.

На основе результатов исследования диапазонов контроля и погрешности магнитных толщиномеров впервые разработана методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров, позволяющая оценивать и корректировать метрологические характеристики на стадии проектирования, изготовления, испытания типа средств измерений, поверки (калибровки) и эксплуатации магнитных толщиномеров, что способствует обеспечению достоверности измерительной информации.

4. Выявлено, что в эксплуатационной документации на магнитные толщиномеры отсутствует часть метрологических и технических характеристик, а также факторов, влияющих на точность толщиномеров, позволяющих потребителю получать полную информацию о приобретаемом средстве измерения. Разработаны рекомендации по совершенствованию показателей качества на магнитные толщиномеры.

В результате проведенных экспериментальных исследований по оценке влияния основных параметров, ограничивающих область применения магнитных толщиномеров, на погрешность толщиномеров выявлено, что толщина основания, на

которое нанесено покрытие, существенно влияет на величину погрешности толщиномера. Исследования толщиномеров ТТ210 и ТТ210 установили, что при толщине основания 0,5, 0,7 и 1,0 мм погрешность прибора превышает допустимое значение.

Большое влияние на погрешность толщиномера оказывают как краевой эффект, так и радиус кривизны основания. Установлено, что при диаметрах оснований 10, 15, 20, 30 мм погрешность прибора превышает допустимое значение.

На основе результатов исследования предложены рекомендации по снижению погрешности, которые включены в методику оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров.

Направления дальнейших исследований:

- разработка проекта предварительного национального стандарта «Основные нормы взаимозаменяемости. Толщина покрытий. Установление геометрических допусков»;

- переработка и регистрация в Росстандарте РФ национального стандарта ГОСТ 8.502-84 «Государственная система обеспечения измерений. Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки»;

- разработка проекта предварительного национального стандарта на технические требования или общие технические требования магнитных толщиномеров покрытий (по аналогии с микрометрами, штангенциркулями и др.);

- проведение исследований по выявлению влияния шероховатости поверхности, материала основания и других влияющих величин на погрешность измерения магнитными толщиномерами.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Гаврилова О.А. Систематизация как фактор нормирования требований к точности изготовления и измерения толщины покрытий материалов и изделий / О.А. Гаврилова, В.С. Секацкий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 10. С. 25 - 31.

2. Гаврилова О.А. Анализ метрологических характеристик средств измерений толщины покрытий / О.А. Гаврилова, В.С. Секацкий // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 4. С. 1 - 6.

3. ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR VERIFICATION OF COATING THICKNESS GAUGES / Gavrilova O.A., Sekatskii V.S., Merzlikina N.V., Morgun V.N. // Measurement Techniques. 2019. Т. 62. № 9.

4. Анализ методик поверки толщиномеров покрытий / О.А. Гаврилова, Секацкий В.С., Мерзликина Н.В., Моргун В.Н. // Метрология. 2019. № 3.

Публикации в иных научных изданиях:

5. Рекомендации по нормированию точности толщины покрытий / О.А. Гаврилова, Н.О. Ледяева // Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы сертификации, управления качеством и документационного обеспечения управления». Красноярск, 2021.

6. ANALYSIS OF REGULATORY DOCUMENTATION FOR THICKNESS OF COATINGS OF MATERIALS AND PRODUCTS / Gavrilova O.A., Sekatsky V.S., Merzlikina N.V., Pikalov Yu.A., Kaposhko I.A. // IOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. С. 52025.

7. TWO-POINT CALIBRATION OF COATING THICKNESS GAUGES: WHAT NEEDS TO BE CONSIDERED TO IMPROVE MEASUREMENT ACCURACY / Gavrilova O.A., Sekatskii V.S., Merzlikina N.V., Pikalov Yu.A., Pikalov Ya.Yu., Kaposhko I.A. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019". Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. 2019. С. 32068.

8. Сравнительный анализ толщины покрытий и диапазона измерений магнитными и токовихревыми толщиномерами / Гаврилова О.А., Соболева М.И., Секацкий В.С. // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научно-практической конференции. 2018.

9. Факторы, влияющие на точность измерений толщины покрытий магнитными толщиномерами / Гаврилова О.А., Соболева М.И., Секацкий В.С. // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование. Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научно-практической конференции. В 3-х томах. Ответственный редактор Е.В. Павлов. 2017.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022662502 Российская Федерация. Программа расчета параметров экстремальных погрешностей магнитного толщиномера / О.А. Гаврилова, В.С. Секацкий, В.А. Коднянко; заявитель и правообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». - № 2022661205; заявл. 20.06.2022; опубл. 05.07.2022. – 1 с.