

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, доцент

*Секацкий Виктор Степанович*

Красноярск - 2023

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ</b> .....	9
1.1 Покрытия материалов, изделий и их показатели качества .....	9
1.2 Основные элементы и процессы метрологического обеспечения измерений и объектов .....	23
1.3 Анализ современного состояния исследований и разработок в области магнитных толщиномеров покрытий .....	35
1.4 Выводы по первой главе.....	40
<b>ГЛАВА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ МАГНИТНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ</b> .....	43
2.1 Нормирование точности толщины покрытий .....	44
2.2 Совершенствование методики поверки толщиномеров покрытий.....	60
2.3 Выводы по второй главе.....	69
<b>ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ПОКРЫТИЙ</b> .....	71
3.1 Анализ погрешности выпускаемых магнитных толщиномеров покрытий.....	71
3.2 Экспериментальная проверка погрешности толщиномеров в нормированном диапазоне измерений.....	82
3.3 Выводы по третьей главе.....	107

<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ В ИНТЕРВАЛЕ ВЛИЯЮЩИХ ВЕЛИЧИН.....</b>	<b>110</b>
4.1 Анализ нормативной документации на показатели качества толщиномеров.....	110
4.2 Исследование влияния толщины основания на погрешность измерения магнитными толщиномерами .....	122
4.3 Исследование влияния краевого эффекта на погрешность измерения магнитными толщиномерами .....	130
4.4 Исследование влияния радиуса кривизны детали на погрешность измерения магнитными толщиномерами .....	136
4.5 Выводы по четвертой главе.....	139
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>141</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>144</b>
Приложение А. Методика определения допусков на толщину покрытий.....	158
Приложение Б. Акт внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы.....	167
Приложение В. Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в АО «НПП «Радиосвязь»».....	168
Приложение Г. Методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров .....	169
Приложение Д. Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва» .....	178

## ВВЕДЕНИЕ

**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 позволят 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.



# **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЙ**

## **1.1 Покрытия материалов, изделий и их показатели качества**

Как правило, современная техника работает в интенсивном режиме, что влечет за собой повышение нагрузок на ответственные поверхности деталей и особенно на узлы трения, все это происходит из-за повышения температуры, давления, скорости. Таким образом, причины поломки оборудования кроются в износе рабочих поверхностей деталей. Следовательно, для повышения надежности техники в целом, необходимо работать над повышением ресурса отдельно взятых деталей.

Объемные составляющие деталей машин и механизмов и их рабочие поверхности рассматриваются как единое целое, которое зависит от выполнения ими функциональных требований. Если конструктивная прочность, надежность и другие зависят от объемных характеристик, то коррозионная стойкость, износостойкость, декоративные свойства и т.п. определяются свойствами поверхности. Для обеспечения заданных свойств поверхности часто используют покрытия, вид которых, способ нанесения и др. определяется свойствами основного материала детали и служебным назначением поверхности.

### **1.1.1 Классификация покрытий материалов и изделий**

При производстве в сфере машиностроения, космической и авиационной техники, медицинского оборудования, бытовой техники и т.п. используют те или иные виды покрытий. Например, лакокрасочные покрытия, металлические и неметаллические неорганические покрытия применяются для защитных и

декоративных целей, повышения эксплуатационного ресурса изделий. Таким образом, покрытия становятся неотъемлемой частью производственного процесса при изготовлении продукции.

Термины и определения основных понятий в области покрытий могут отличаться в разных литературно-технических источниках, в частности и в стандартах. Для исключения противоречий, как в терминологии, так и в определяющих физический смысл понятиях, в данной работе используем нижеследующие термины и определения. ГОСТ 9.008-2021 [1] приводит: «покрытие – это слой или несколько слоев материала, искусственно полученных на покрываемой поверхности». По мнению авторов работы [2] это наиболее удачное определение. Для лакокрасочных покрытий ГОСТ 9.072-2017 [3] приводит следующее определение: «лакокрасочное покрытие – сплошное покрытие, сформированное в результате нанесения одного или нескольких слоев лакокрасочного материала на окрашиваемую поверхность». Это определение не противоречит первому, поэтому в дальнейшем для определения толщины любого вида покрытия будем использовать термин «покрытие».

При многослойных покрытиях используются термины «внешний слой покрытия – это слой, поверхность которого соприкасается с окружающей средой», и «подслой – каждый из слоев многослойного покрытия, расположенный под внешним слоем покрытия».

В качестве покрываемой поверхности ГОСТ 9.008-2021 [1] принимает «основной покрываемый металл». Так как покрытия могут наноситься и не на металлические поверхности, то вместо термина «основной покрываемый металл» принимаем термин «основание – объект, находящийся под покрытием или служащий для получения на нем покрытия», который устанавливает ГОСТ 8.362-79 [4]. Тогда толщина покрытия – это расстояние по нормали между поверхностью основания и поверхностью внешнего слоя покрытия. ГОСТ 9.008-2021 [1] вводит понятия местная толщина покрытия (толщина в заданном месте), максимальная толщина покрытия и минимальная толщина покрытия. ГОСТ 31933-2013 [14] для

лакокрасочных покрытий устанавливает среднюю толщину покрытия как среднеарифметическое значение результатов определенного количества однократных измерений толщины, равномерно распределенных на площади испытания.

Наиболее полную классификацию покрытий приводят М. Л. Лобанов, Н. И. Кардолина и др. в учебном пособии «Защитные покрытия» [5]. Все покрытия авторы подразделяют по природе материалов на три группы: органические, неорганические и органо-неорганические (рисунок 1.1).

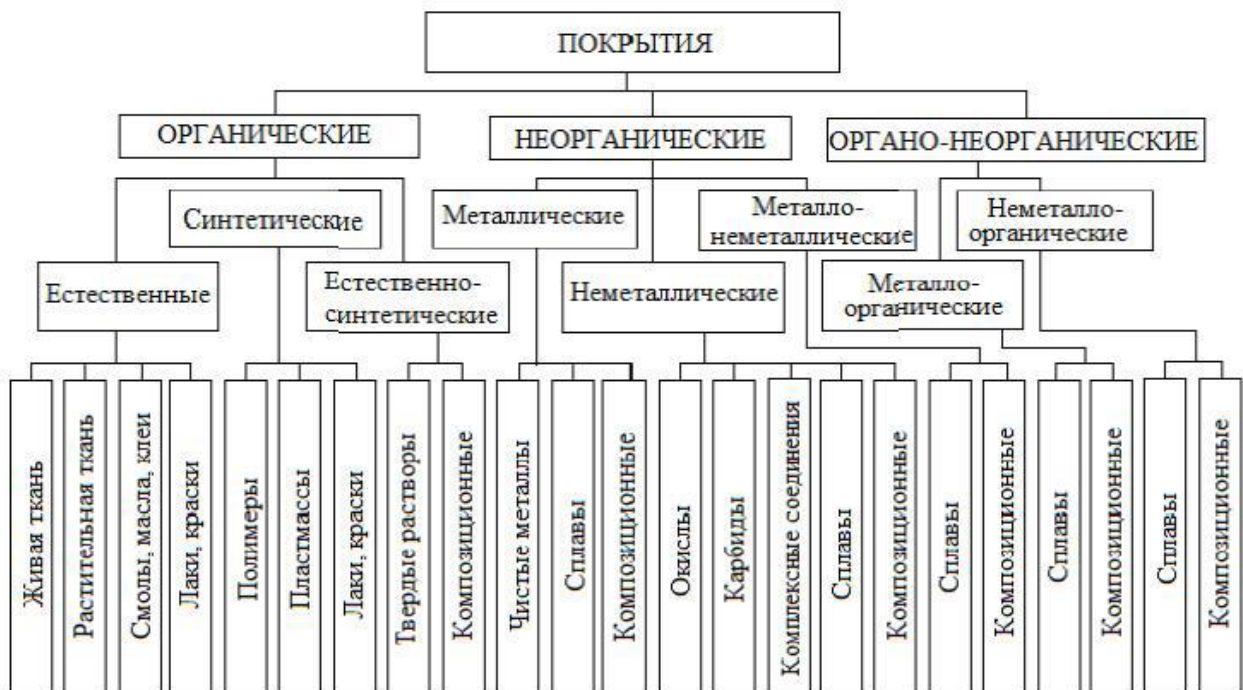


Рисунок 1.1 - Классификация покрытий по материалам

Однако, если дальше раскрыть каждый материал в зависимости от совокупности признаков по способу получения покрытий, по функциональным признакам и др., то такая классификация не будет восприниматься из-за своих огромных размеров. Например, для изготовления только металлических покрытий используют в общей сложности 24 металла и 34 типа сплавов [23].

Поэтому предлагаем все покрытия разделить на три укрупненные группы так, как они объединены в нормативных документах:

- 1) покрытия металлические и неметаллические неорганические,

регламентированные ГОСТ 9.008–2021 [1], ГОСТ 9.301–86 [6], ГОСТ 9.306–85 [7], ГОСТ 9.302–88 [8], ГОСТ 9.303–84 [9];

2) покрытия лакокрасочные, регламентированные ГОСТ 9.032–74 [10], ГОСТ 9.104–2018 [11], ГОСТ 9.105–80 [12], ГОСТ 9.402–2004 [13], ГОСТ 31993–2013 [14];

3) прочие покрытия: газотермические ГОСТ 9.304–87 [16], покрытия горячие цинковые ГОСТ 9.307–89 [17] и алюминиевые ГОСТ 9.315–91 [18], покрытия органосиликатные ГОСТ 9.406–84 [19], покрытия порошковые полимерные ГОСТ 9.410–88 [20] и др.

С точки зрения толщинометрии, выбора средства измерения толщины покрытия, метрологического обеспечения при измерении толщины покрытия и т.п. покрытие необходимо рассматривать в совокупности с основанием, на которое оно нанесено. Для решения задач контроля толщины покрытий определены сочетания покрытия и основания [2, 21]:

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.

К ферромагнитным электропроводящим материалам основаниям можно отнести большинство черных металлов, а к неферромагнитным электропроводящим материалам – большинство цветных металлов. К диэлектрическим материалам относятся пластики, стекло, резина, лакокрасочные материалы и т.п.

Для наглядности и удобства дальнейших исследований сочетания покрытий и оснований представим в виде схемы (рисунок 1.2).

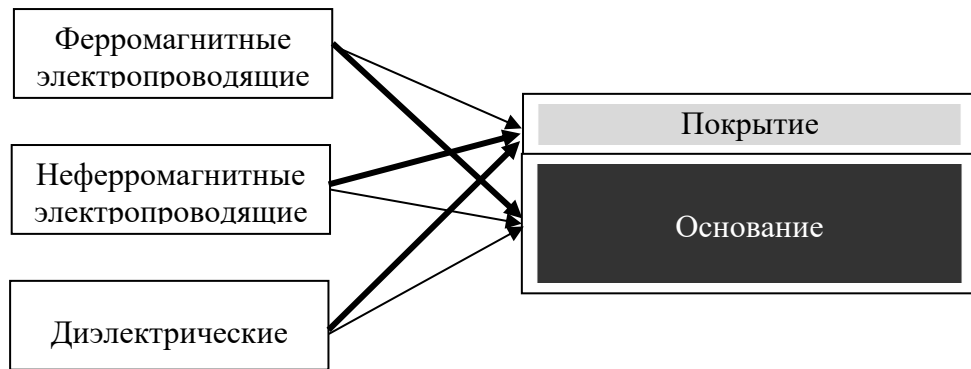


Рисунок 1.2 - Сочетание материалов покрытий и оснований

К ферромагнитным электропроводящим материалам основаниям можно отнести большинство черных металлов, а к неферромагнитным электропроводящим материалам – большинство цветных металлов. К диэлектрическим материалам относятся пластики, стекло, резина, лакокрасочные материалы и т.п.

Приведенные на рисунке 1.2 варианты сочетаний материалов покрытий и оснований позволяют сориентироваться в выборе метода и средства измерения толщины покрытия. Эти положения будут использованы при проведении дальнейших исследований.

### 1.1.2 Толщина как основной показатель качества покрытий

Качество покрытий характеризуется определенными показателями качества. Для покрытий металлических и неметаллических неорганических требования к покрытиям установлены ГОСТ 9.301–86 [6], а методы их контроля устанавливает ГОСТ 9.302-88 [8]. К основным требованиям относятся:

- внешний вид покрытий. Выявление дефектов поверхности покрытия проводят осмотром деталей невооруженным глазом на расстоянии 25 см от контролируемой поверхности при естественном или искусственном освещении. Внешний вид лакокрасочных покрытий оценивают по ГОСТ 9.407–2015 [25];

- толщина покрытий, величину которой определяют разрушающим или неразрушающим методами;

- пористость покрытий. Методы основаны на взаимодействии металла основания с реагентом в местах пор с образованием окрашенных соединений (метод погружения, метод наложения фильтровальной бумаги, метод паст и т. п.);

- прочность сцепления покрытия с материалом основания. При контроле могут использоваться методы полирования, изгиба, растяжения и др.

Кроме того, в качестве показателей качества могут служить защитные свойства неметаллических неорганических покрытий, химический состав покрытий, маслостойкость покрытий, функциональные свойства покрытий и др.

Конкретные требования к покрытиям по ГОСТ 9.301-86 [6] зависят от его вида. Например, медные и никелевые покрытия оценивают внешним видом, толщиной покрытия, химическими свойствами, пористостью и функциональными свойствами; палладиевые покрытия – внешним видом, толщиной покрытия и функциональными свойствами. Анализ показывает, что толщина покрытия присутствует для оценки всех видов покрытий.

Таким образом, толщина - один из основных показателей качества покрытия [32, 36]. Соответствие толщины покрытия установленным техническим и экономическим требованиям обеспечивает эффективность защитной функции

покрытия. Наряду с обеспечением необходимой толщины покрытия, целесообразно сведение к минимуму расходов, связанных с нанесением покрытия и сохранение коррозионной защиты, долговечности и других функций покрытия. Например, ущерб, причиняемый коррозией, включает не только прямые потери: стоимости разрушившейся конструкции и замены оборудования, затраты на защиту от коррозии, но и косвенные потери, связанные с простоем оборудования при замене деталей и узлов, пострадавших от коррозии, утечкой продуктов, нарушением технологических процессов [80].

Практически во всех нормативных документах ставится обязательное условие гарантированного обеспечения заданной толщины покрытия. Особенно актуально данное требование в связи с применением в современной продукции покрытий из высокотехнологичных материалов, обладающих высокой стоимостью, поэтому регламентирование технологических допусков и снижение погрешностей измерений – цель для экономии финансовых и материальных ресурсов [24].

В технической документации указывают минимальное значение толщины покрытия, которая должна обеспечить защитную способность и его функциональные и специальные свойства в заданных условиях эксплуатации. Кроме того, минимальная толщина покрытий должна обеспечить заданный срок службы изделий.

Максимальная толщина покрытий, как правило, определяется необходимостью экономии материала или учитывая технологические возможности [2, 33]. Увеличение толщины покрытий на сопрягаемых поверхностях изделий влечёт за собой уменьшение зазоров, увеличение натягов в сопряжениях.

Из вышеприведённого следует, что нормирование толщины покрытий и определение её действительного значения с заданной точностью при проектировании и изготовлении продукции является актуальной задачей.

### 1.1.3 Методы определения толщины покрытий

Метрологическое обеспечение измерения толщины покрытий подчиняется общим закономерностям существования и развития физических явлений. Вместе с тем оно имеет свои особенности, вытекающие из самого понятия толщины покрытия [2].

Толщина покрытия является геометрическим параметром. Она представляет собой линейный размер. Особенностью измерения толщины покрытия является то, что при неразрушающем методе контроля данный линейный размер отличается от других аналогов (длины, высоты и т.п.) тем, что для его контроля имеется доступ только с одной стороны – внешней поверхности покрытия. Противоположная же сторона покрытия связана с основанием и не имеет открытого доступа для контакта со средством измерения.

Особенность современного метрологического обеспечения контроля толщины покрытия состоит в том, что используется большое количество материалов покрытий, которые наносятся на такое же многообразие материалов оснований. Свойства материала покрытия и свойства материала основания влияют на выбор метода и средств, которые позволят измерить толщину покрытия для заданного сочетания материалов. Поэтому требуется соответствующее обоснование применяемых решений по всем вопросам разработки, организации и осуществления метрологического обеспечения измерений толщины покрытий.

Выбранные, исходя из сочетаний материалов, средства измерений толщины покрытий еще не гарантируют получения достоверного результата. Причин может быть несколько. Это зависимость погрешности измерения от величины толщины покрытия, от толщины основания, от кромочного эффекта и других влияющих факторов, приведенных в ГОСТ 31993-2013 [14]. Частично данные факторы изучены, частично – нет.

Неразрушающий контроль находит всё большее применение, т.к. возрастает объём производства и дальнейшей эксплуатации дорогостоящих, наукоёмких



объектов. Классификация видов и методов неразрушающего контроля физических единиц установлена ГОСТ Р 56542-2019 [43]. Под видом неразрушающего контроля стандарт определяет «группу методов неразрушающего контроля, объединенных общностью физических явлений, положенных в его основу», метод контроля – это «правила применения определенных принципов и средств контроля». В зависимости от физических явлений, положенных в основу неразрушающего метода контроля, стандарт устанавливает десять видов контроля: акустический, виброакустический, вихретоковый, магнитный, оптический, проникающими веществами, радиационный, радиоволновой, тепловой, электрический. Большое разнообразие различных методов затрудняет создание нормативной базы для определенных групп средств измерений.

Применительно к толщине покрытий такой подход раскрыт в работах Сясько В.А., обобщенных в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук [45]. Неразрушающий контроль толщины покрытий представлен 6 основными видами, которые объединяют 19 методов контроля.

Такая классификация создает определенные трудности как при выборе толщиномеров, так и мер толщины покрытий [2].

Другой подход принят в стандартах, регламентирующих методы контроля толщины покрытий, и научной литературе. Так, для контроля толщины металлических и неметаллических неорганических покрытий ГОСТ 9.302-88 [8] устанавливает следующие методы неразрушающего контроля:

- магнитные методы (магнитоотрывной, метод магнитного потока, магнитоиндукционный);
- метод вихревых токов;
- радиационные методы (метод обратного рассеяния бета-излучения, рентгенофлюоресцентный);
- термоэлектрический метод;
- оптический метод.

Для лакокрасочных покрытий ГОСТ 31993-2013 [14] устанавливает четыре

метода определения толщины покрытий. Один из них основан на механическом принципе (измерение толщины покрытия микрометром или индикатором), а три – на магнитном принципе (метод отрыва магнита, метод магнитной индукции, метод вихревых токов).

Классификацию методов неразрушающего контроля можно встретить как в учебной литературе, так и в научной. И каждый автор представляет её по-своему. Так, в работе Наумчика И.В., Шевченко А.В., Алексеева К.В. [44] приводится восемь основных методов неразрушающего контроля толщины покрытий, большинство из которых могут иметь от двух до шести разновидностей. Бабаджанов Л.С. обобщает различные отечественные и зарубежные классификации методов измерений покрытий и приходит к выводу, что наибольшее распространение получили восемь методов: магнитный отрывной, электромагнитный (вихретоковый), магнитоиндукционный, радиоизотопный, термоэлектрический, магнитоиндуктивный и кулонометрический, в меньшей степени распространены магнитостатический, оптический, интерференционный, емкостный, рентгеновский, спектрометрический и гравиметрический [2].

Аналогичные классификации приводятся и в учебной литературе: в учебниках [46], учебных пособиях [47] и других учебно-методических источниках.

Приведенные выше классификации, не смотря на свою индивидуальность, охватывают основные методы неразрушающего контроля толщины покрытий. Их можно использовать при выборе толщиномеров в соответствии с регламентированной рекомендациями по метрологии Р50.2.006-2001 [22] Государственной поверочной схемой для средств измерения толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм. В качестве рабочих средств измерений применяют меры толщины и толщиномеры покрытий, которые сгруппированы по назначению в зависимости от вида материалов покрытий и оснований. Схематически перечень рабочих средств измерений представлен на рисунке 1.3.

Для первой и четвертой групп толщиномеров из данной схемы подходят

магнитные методы неразрушающего контроля толщины покрытий. Магнитные методы присутствуют во всех классификациях независимо от авторов, нормативных документов и т.п. Они применяются как для контроля толщины металлических и неметаллических неорганических покрытий, так и для лакокрасочных. Широкий диапазон применения толщиномеров, основанных на магнитных методах, лег в основы выбора их для дальнейших исследований.



Рисунок 1.3 - Рабочие средства измерений по поверочной схеме Р50.2.006-2001

Магнитные методы неразрушающего контроля толщины покрытий имеют свои преимущества и недостатки. Преимуществами являются:

- точность определения толщины покрытий из неферромагнитных

материалов не зависит от электрических свойств последних;

- достаточно большая глубина проникания;
- односторонний доступ;
- безопасность контроля.

К недостаткам относят:

– неприменимость метода для немагнитных материалов (ограниченность в выборе толщиномеров);

– необходимость повторной тарировки по эталонам толщины покрытий при применении другого сочетания материала покрытия и основания. Тарировка предусмотрена в большинстве толщиномеров и направлена на повышение точности измерений;

– влияние на результаты контроля магнитных свойств материала контролируемого изделия, которые определяются его химическим составом, термической и механической обработкой, намагниченностью изделия. Снижение влияния данного фактора возможно при правильном выборе мер толщины и оснований при тарировке толщиномера;

– зависимость результатов контроля от формы (кривизны) поверхности изделий, чистоты обработки их поверхности, проявления краевого эффекта. Данные факторы являются предметом исследования в данной работе.

Рассмотрим подробнее магнитные методы, основанные на анализе взаимодействия магнитного поля с контролируемым объектом. В толщиномерах, основанных на магнитном отрывном методе оценки толщины покрытий, критерием является сила отрыва или сила притяжения магнита, либо вариация напряженности магнитного поля в цепи постоянного магнита или электромагнита. Сила отрыва в толщиномерах с постоянным магнитом регистрируется пружинными динамометрами [47], а в толщиномерах с электромагнитом – определяется по изменению тока намагничивания. В настоящее время толщиномеры, основанные на магнитном отрывном методе оценки толщины покрытий, имеют ограниченное применение. Одной из причин является высокая

относительная погрешность измерения, которая находится в районе  $\pm 10\%$ . Поэтому в Госреестре СИ за последние десять лет не зарегистрирован ни один толщиномер, в основу которого положен магнитный отрывной метод оценки толщины покрытий

К магнитным можно отнести толщиномеры покрытий, основанные на индукционном принципе. В данном методе определяется изменение толщины покрытия, выполняющее роль магнитного сопротивления. В указанных толщиномерах, как правило, используется низкая частота порядка 50 - 1000 Гц. Показания толщиномеров зависят от магнитных свойств оснований и не зависят от электропроводности покрытия. Индукционными толщиномерами измеряют немагнитные и слабомагнитные покрытия на магнитном основании. Они применяются для диапазона толщины покрытий вплоть до 12 мм. Достигнута погрешность порядка 5 %.

В толщиномерах покрытий, основанных на индуктивном принципе, регистрируется изменение индуктивного сопротивления катушки преобразователя толщиномера в зависимости от изменения толщины покрытия, выполняющего роль магнитного сопротивления в цепи датчик - объект.

Индуктивными толщиномерами измеряют немагнитные и слабомагнитные покрытия на магнитном основании. Они применяются для диапазона до 200 мм, достигнута погрешность порядка 3 - 5 % [2].

Представим краткую характеристику основных методов, используемых в современных толщиномерах. Более подробно эта информация приведена в работе [44].

Электромагнитные методы основаны на взаимодействии электромагнитного поля, который создаётся катушкой индуктивности преобразователя толщиномера, с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в контролируемом объекте. На их основе работают токовихревые толщиномеры, которые позволяют измерять толщину проводящих покрытий на изделиях из диэлектриков и диэлектрических покрытий – на изделиях из немагнитных сплавов.

Практически любое сочетание материалов покрытия и основания доступны для измерения толщины покрытий толщиномерами, в основу которых заложены радиационные методы, основанные на измерении параметров ионизирующего излучения, которое изменяется в зависимости от толщины измеряемого материала.

Тепловые методы контроля, основанные на измерении теплопроводности покрытия в зависимости от его толщины и физико-химических характеристик, применяются при существенном отличии теплотехнических свойств материалов покрытия и основания.

Акустические методы контроля применяются в случае существенного отличия материалов покрытия и основания по величине акустического сопротивления.

Оптические методы контроля, основанные на взаимодействии светового излучения с покрытием, используют для контроля толщины прозрачных или тонких покрытий.

Каждый метод неразрушающего контроля имеет свои ограничения по применению, свои преимущества и недостатки. В целом, созданные на их основе средства контроля толщины покрытий, обеспечивают проведение контроля для любых сочетаний материалов покрытий и оснований, практически для любых деталей и изделий в большинстве отраслей экономики.

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

## **1.2 Основные элементы и процессы метрологического обеспечения измерений и объектов**

### **1.2.1 Основные понятия в области метрологического обеспечения измерений**

Качество выпускаемой продукции, как правило, зависит от объёма и достоверности контроля технологических параметров производства и параметров готовой продукции. Затраты на организацию и проведение контроля составляют около 20 % от общих затрат на создание продукции [42].

Измерительная информация, получаемая по результатам проведенных измерений, служит основанием для принятия решения о состоянии объекта измерений, начиная от принятия решения о годности отдельных деталей до безопасности объекта, поступившего потребителю. Неполная или недостоверная измерительная информация является причиной несоответствия качества продукции установленным требованиям, риском для обеспечения безопасности потребителей и т.п. На повышение качества измерительной информации направлено метрологическое обеспечение объекта или измерений.

Под метрологическим обеспечением измерений понимается систематизированный, строго определенный набор средств и методов, направленных на получение измерительной информации, обладающей свойствами, необходимыми для выработки решений по приведению объекта управления в целевое состояние [41]. Метрологическое обеспечение измерений распространяется в первую очередь на области деятельности, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений. На практике метрологическое обеспечение находит применение во всех областях, где осуществляются измерения.

Метрологическое обеспечение измерений - совокупность элементов и процессов (рисунок 1.4), необходимых для получения полной и достоверной измерительной информации.

При проектировании метрологического обеспечения измерений устанавливают требования к показателям точности и полноте, достоверности, своевременности и актуальности измерительной информации; осуществляют выбор принципов, методов и методик измерений, а также выбор элементов метрологического обеспечения измерений.

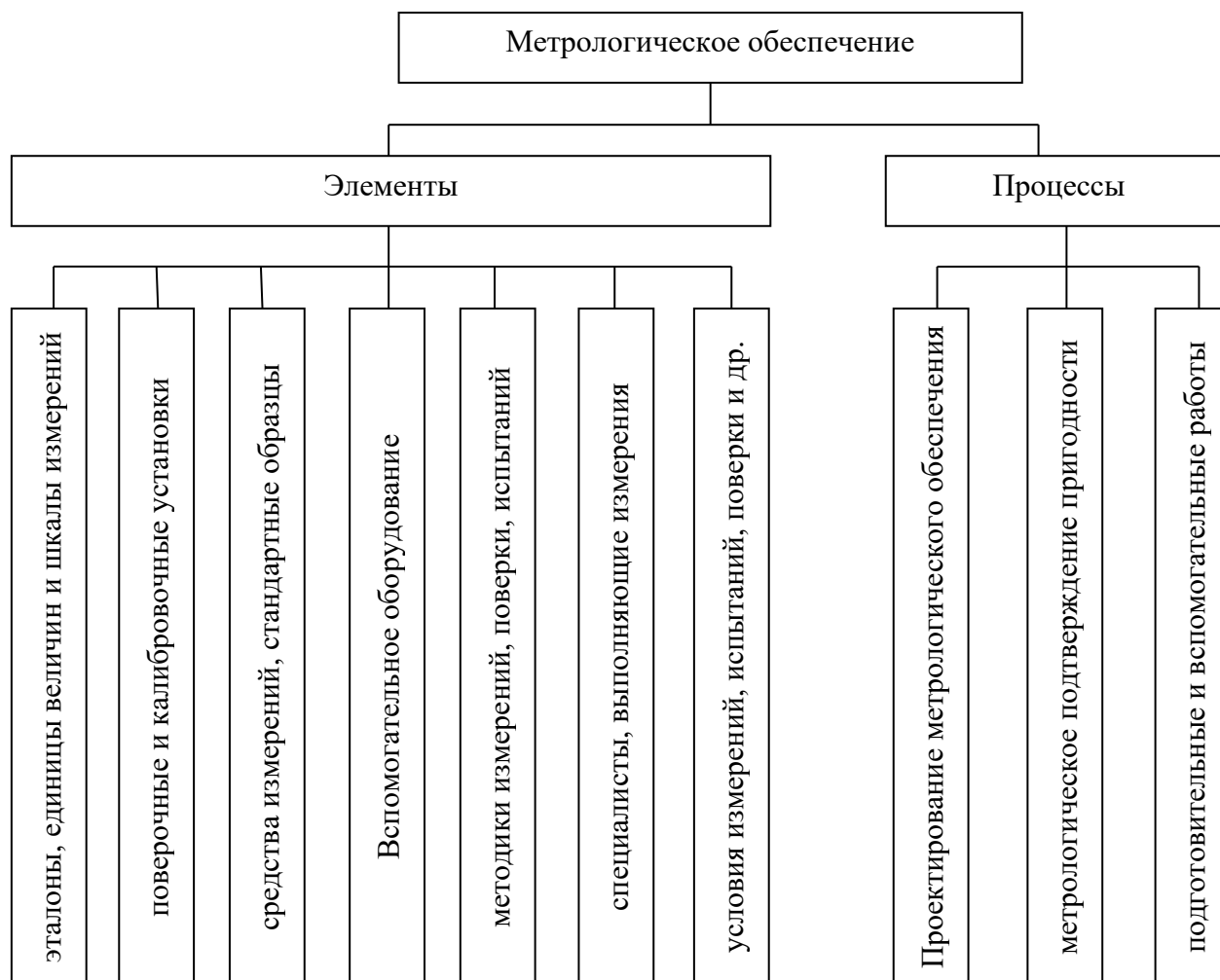


Рисунок 1.4 – Структура метрологического обеспечения измерений

Метрологическое подтверждение пригодности элементов метрологического обеспечения измерений включает в себя: аттестацию эталонов; утверждение типа, поверку или калибровку средств измерений и стандартных образцов; оценку соответствия вспомогательного оборудования; метрологическую аттестацию методик измерений; метрологическую экспертизу документов; оценку квалификации; контроль условий выполнения измерений.



## 1.2.2 Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий

Рассмотрим основные элементы метрологического обеспечения, приведенные на рисунке 1.4, применительно к измерению толщины покрытий.

**Эталоны, единицы величин и шкалы измерений.** Как было сказано выше, толщина покрытия относится к геометрическим параметрам и представляет линейный размер. Следовательно, для измерения толщины покрытия используется основная единица физических величин – метр [51]. На практике применяются дольные единицы - миллиметр и микрометр. Для измерения толщины покрытий специальных шкал не требуется.

Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 20000 мкм [22] предусматривает использование установки высшей точности для воспроизведения единицы длины в области измерений толщины покрытий в диапазоне от 1 до 30 мкм, рабочих эталонов и рабочих средств измерений.

Меры толщины покрытий различных сочетаний применяют и в качестве рабочих средств измерений. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей мер толщины покрытий варьируют от  $(0,2 + 0,05 h)$  до  $(0,3 + 0,05 h)$  мкм, где  $h$  – толщина покрытий. Эти меры толщины покрытий используют при проведении испытаний толщиномеров.

Методика первичной и периодической поверки эталонов толщины покрытий приведена в рекомендации МИ 1903-97 [52]. Она распространена на ступенчатые эталоны в диапазоне от 0,1 до 3000 мкм и предусматривает операции и средства поверки, требования безопасности, условия подготовки и проведения поверки, обработку и оформление результатов.

Основы метрологического обеспечения мер толщины покрытий были заложены в работах отечественных ученых Баташева К. П., Макаренко Н. В., Богуславского М. Г., Шаровой Е. Е., Лаанеотса Р. А. [53, 54, 59 и др.]. При их участии были разработаны средства поверки толщиномеров покрытий, в частности

меры толщины покрытий для различных толщиномеров. Более детально меры толщины покрытий исследованы в работах Бабаджанова Л.С., Бабаджановой М. Л. [55, 56, 57, 58, 60, 2 и др.]. По результатам исследований были созданы высокоточные меры толщины покрытий и разработан проект стандарта ГОСТ Р «Контроль неразрушающий. Меры толщины покрытий. Основные параметры и общие технические требования». Кроме того, результаты исследований были учтены при разработке Государственной поверочной схемы для средств измерений толщины покрытий [22]. Таким образом, данный элемент метрологического обеспечения измерений толщины покрытий достаточно исследован и разработан. Остается незакрытым процесс перевода проекта в национальный стандарт на меры толщины покрытий.

**Специальные поверочные и калибровочные установки** для средств измерений толщины покрытий не требуются, поэтому данные элементы метрологического обеспечения не рассматриваем.

**Средства измерений.** При неразрушающем контроле в качестве средств измерений толщины покрытий используются толщиномеры, которые обладают своими метрологическими характеристиками, поэтому на них распространяются все правила и нормы метрологического обеспечения.

К средствам измерений предъявляются метрологические и технические требования. В эксплуатационной или другой нормативной документации приводятся требования, которые гарантируют полную и достоверную информацию о средствах измерений для обеспечения возможности их правильного выбора [61]. Средства измерения утвержденного типа, которые прошли проверку на соответствие данным требованиям, допускаются к применению в сфере государственного регулирования.

К конструкции средств измерений предъявляются технические требования. Метрологические требования устанавливаются к метрологическим характеристикам (параметрам) измерений, влияющим на результат и точность измерений, и к условиям, при которых эти параметры должны быть обеспечены

[62]. Подробнее метрологические характеристики толщиномеров будут рассмотрены ниже.

**Вспомогательное оборудование.** Как перед началом проведения измерений, так и в процессе измерений через определенный промежуток времени толщиномеры покрытий должны проходить процедуру калибровки. Для этого в комплект толщиномеров, как правило, входит набор мер толщины и основание, по которым проводится калибровка прибора. На результат измерения влияет не только соотношение толщины меры и толщины покрытия, но и соотношение толщины прилагаемого основания и толщины объекта, на который нанесено покрытие. Поэтому данный вопрос подлежит дополнительному исследованию.

**Методики измерений, поверки, испытаний.** При нахождении толщины покрытия толщиномерами в большинстве случаев проводятся прямые измерения, поэтому методики измерений включаются в эксплуатационную документацию на средства измерений [62]. В процессе утверждения типов средств измерений осуществляется подтверждение соответствия данных методик измерений обязательным метрологическим требованиям к измерениям, проведение аттестации методик измерений не требуется.

Методика поверки толщиномеров регламентирована ГОСТ 8.502-84 [63]. Однако, для утверждения типа средств измерений для большинства толщиномеров используются методики поверки, которые отличаются от требований вышеуказанного стандарта. Поэтому данный элемент метрологического обеспечения требует дополнительного изучения.

### **1.2.3 Анализ метрологических характеристик средств измерений толщины покрытий**

Метрологическая характеристика – это характеристика одного из свойств средства измерений, влияющая на результат измерений [64]. Метрологические характеристики устанавливают для каждого типа средств измерений, они

необходимы для:

- определения результатов измерений и оценки погрешности измерений;
- контроля средств измерений на соответствие установленным нормам при поверке;
- сравнения и оптимального выбора средств измерений и т.п.

Различают действительные и нормируемые метрологические характеристики. Действительные метрологические характеристики – это характеристики средств измерений, полученные экспериментально. Нормируемые метрологические характеристики – это совокупность метрологических характеристик данного типа средств измерений, устанавливаемая нормативными документами на средства измерений (стандарты технических условий и стандарты технических требований на средства измерений, технические условия и др.)

Номенклатуру и способы нормирования метрологических характеристик устанавливает ГОСТ 8.009-84 [65]. Определены следующие группы нормируемых метрологических характеристик:

- характеристики, которые предназначены для определения результатов измерений;
- характеристики погрешностей средств измерений;
- характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам;
- динамические характеристики средств измерений;
- характеристики средств измерений, которые отражают их способность влиять на инструментальную составляющую погрешности измерений из-за взаимодействия средств измерений с любым из подключенных к их входу или выходу компонентов (таких как объект измерений, средство измерений и т. п.);
- неинформативные параметры выходного сигнала средства измерений.

Для каждой группы в стандарте приводится ряд метрологических характеристик, которые будем учитывать при дальнейшем анализе.

ГОСТ Р 8.674-2009 [66] устанавливает следующий перечень нормируемых

метрологических характеристик:

- указание вида измеряемой величины (величин);
- диапазон (диапазоны) измерений;
- виды и значения влияющих величин (при необходимости - их диапазоны);
- пределы допускаемой погрешности или неопределенность для каждого выделенного диапазона (поддиапазона) измеряемых величин;
- при необходимости – формулы для оценки систематической, случайной или суммарной погрешности в зависимости от значения измеряемой или влияющих величин.

Рассмотрим метрологические характеристики магнитных толщиномеров покрытий. Основной целью метрологического обеспечения измерений толщины покрытий является качество измерений – единство, точность и достоверность. Для эффективного выполнения поставленных целей необходимо, в частности, и установление общих требований к метрологическим характеристикам толщиномеров покрытий [2].

Сведения по метрологическим характеристикам, приведенные в ГОСТ 8.009-84 [65] и в ГОСТ Р 8.674-2009 [66], не противоречат, а дополняют друг друга или дают более конкретное определение. Адаптируем требования данных стандартов для нормируемых метрологических характеристик магнитных толщиномеров покрытий, принимая за основу ГОСТ 8.009-84 [65] с учетом дополняющих требований по ГОСТ 8.674-2009 [66]:

1. Характеристики, предназначенные для определения результатов измерений.

1.1 Вид измеряемой величины. Измеряемой величиной является толщина покрытий. Особенностью при измерении толщины покрытий является то, что принцип работы толщиномера способен обеспечить ограниченное сочетание материалов покрытия и основания. Например, магнитными толщиномерами можно измерять толщину немагнитного покрытия на магнитном основании. Следовательно, эта информация должна быть указана в технической

документации.

1.2 Диапазон (диапазоны) измерений. Согласно РМГ 29-2013 [64] «диапазон измерений – множество значений величин одного рода, которые могут быть измерены данным средством измерений или измерительной системой с указанными инструментальной неопределенностью или указанными показателями точности при определенных условиях». В технической документации указывают нижнюю и верхнюю границы диапазона измерений.

Анализ показал, что диапазон измерений приводится в технической документации всех исследуемых толщиномеров [67]. При этом у подавляющего большинства толщиномеров нижняя граница диапазона равна нулю [35]. В данном случае «ноль» означает отсутствие покрытия, значит нечего и измерять. Но необходимо учитывать, что толщина покрытий, например, драгоценных металлов и сплавов - единицы и даже десятые доли микрометра [7]. А погрешность измерения в точке, близкой к нулю колеблется для разных моделей по-разному: от  $\pm 1$  мкм (толщиномеры серии ЕМР (Германия)) до  $\pm 5$  мкм (толщиномеры МТДП-1 (Беларусь) и МРОРН-ФР (Германия)). Диапазон измерений толщиномера ТМ-4 с преобразователем М120 составляет от 1 до 2000 мкм, а погрешность у нижней точки диапазона в четыре раза больше измеряемой величины. И таких примеров можно приводить много.

Следовательно, при нормировании нижней и верхней границ диапазона измерений необходимо обеспечить достоверность измерений с погрешностью, указанной в технической документации. Это же касается и толщиномеров, у которых диапазон измерений разбит на поддиапазоны.

1.3 Значение однозначной или значения многозначной меры. В комплект толщиномера, как правило, входят мера (или меры) толщины покрытий и основание, с помощью которых осуществляется калибровка прибора в процессе эксплуатации. Погрешность меры при калибровке вносит систематическую погрешность измерения. Несоответствие габаритных размеров основания допустимым значениям для конкретного прибора может внести погрешность из-за

кромочного эффекта, а толщина основания существенно влияет на погрешность измерения, если она отличается от толщины контролируемой поверхности. В технической документации сведения о размерах прилагаемого основания встречаются не часто. Например, для толщиномеров покрытий серии МТ приводятся допустимые размеры основания и его толщина, что исключает появления дополнительной погрешности из-за кромочного эффекта.

Значение мер толщины и размеры прилагаемого основания в технической документации на толщиномеры приводятся редко. Например, в руководстве по эксплуатации и в описании типа толщиномеров серии ТМ-20МГ приведены значения прилагаемых к прибору мер толщины в зависимости от диапазона измерений (модификации толщиномера). Однако, это скорее исключение, чем правило. По мерам толщины проводится калибровка прибора при настройке диапазона измерений. Толщина меры при этом выбирается исходя из предполагаемого диапазона контролируемых величин. При этом и номинальное значение, и действительный размер меры будут влиять на результат измерений, а значит, они относятся к метрологическим характеристикам и должны отражаться в технической документации на толщиномеры. Кроме того, ГОСТ 8.502-84 [63] в разделе «Определение основной погрешности средств измерений, входящих в комплект толщиномера» предусматривает проведение контроля значения толщины меры при поверке толщиномеров. Но на практике данное требование не входит в методики поверки конкретных толщиномеров и толщина мер, входящих в комплект прибора, не проверяется. Например, методика МП АПМ 65-18 для поверки толщиномеров серии ТП-1, методика 203-56-2017 для поверки толщиномера серии МТ и др.

1.4 Цена деления шкалы или цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде.

Определение цены деления шкалы как разности значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы средства измерений, больше относится к аналоговым средствам измерений. Для современных толщиномеров с

цифровым отсчетным устройством необходимо использовать характеристики «разрешение – наименьшее изменение измеряемой величины, которое является причиной заметного изменения соответствующего показания или «разрешающая способность измерительного прибора – наименьшая разность между показаниями, которая может быть заметно различима». Термин «цена единицы наименьшего разряда» РМГ 29-2013 [64] не предусмотрен. Такие характеристики в технической документации толщиномеров встречаются, но называются по-разному: «разрешение» – толщиномеры серии ТТ; «цена единицы наименьшего разряда» – толщиномеры серии ТМ-20МГ; «дискретность отсчета» – толщиномеры серии МТ и т.п. Такой подход не соответствует принципам стандартизации и создает определенные трудности у потребителей при выборе средства измерений толщины покрытия.

## 2. Характеристики погрешностей средств измерений.

Поверенное средство измерений толщины покрытий должно обеспечить достоверность измерений с заданной погрешностью и для указанного диапазона толщин покрытий. Обязательно должны учитываться влияющие факторы, которые необходимо нормировать в технической документации, например, наименьшая толщина основания контролируемой детали, наименьший радиус измеряемой поверхности и т.п. Следовательно, в данном пункте необходимо учитывать две метрологические характеристики: погрешность средств измерений и погрешность средств измерений в интервале влияющей величины.

2.1 Погрешность средств измерений. Установлено, что погрешность толщиномеров изменяется с варьированием толщины покрытия и зависит от конструкции прибора (ГОСТ 31993—2013 [14]). Поэтому на большую часть толщиномеров в технической документации абсолютную погрешность прибора записывают математическим выражением, например, «пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения толщины покрытия составляют  $\pm(0,03X+2)$  мкм, где  $X$  – измеренное значение толщины покрытия, мкм».

Регламент проверки погрешности толщиномера установлен в



соответствующей методике поверки на конкретную модель толщиномера либо на определенную серию приборов. Анализ методик поверки толщиномеров показал, что в большинстве случаев оценивается только систематическая составляющая погрешности путем нахождения среднего арифметического значения из всех измеренных (как правило, больше пяти) и сравнения его с действительным значением меры толщины. В случае симметричного расположения показаний прибора относительно номинального значения меры в результате поверки окажется толщиномер с нулевой погрешностью. При данной методике поверки высокая вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра толщиномера [68]. При определении основной погрешности толщиномеров покрытий в процессе проведения поверки проводят прямые многократные измерения. Следовательно, должна учитываться как систематическая, так и случайная составляющие погрешности измерения (ГОСТ Р 8.736-2011 [69]).

2.2 Погрешность средств измерений в интервале влияющей величины. В ГОСТ 31993-2013 [14] приведен перечень факторов, влияющих на точность измерения толщины покрытия. Анализ технической документации на толщиномеры покрытий [67], показал, что только в 46% технической документации на толщиномеры количественно или качественно нормируют или обращают внимание на влияние краевого эффекта на погрешность измерения. В 78 % случаев рекомендуют учитывать толщину измеряемой поверхности и ее кривизну; кроме того, могут нормировать отдельно радиус внутренней и наружной поверхностей. Влияние шероховатости измеряемой поверхности и (или) прилегаемого основания учтено в 15 % исследуемых толщиномеров.

На погрешность измерения толщины покрытия влияют магнитные свойства материала измеряемой поверхности и внешние электромагнитные помехи. Для снижения влияния магнитных свойств материала ГОСТ 31993-2013 [14] рекомендует размагнитить испытуемый образец или при использовании двухполюсного прибора с постоянным магнитным полем проводить измерения в

двух направлениях, отличающихся на  $180^\circ$ .

Влияние внешних электромагнитных помех можно снизить или исключить нормированием допустимого значения силы электромагнитного поля и расстояния до его источников. Например, для толщиномера ET-111 в технической документации приведено, что сила электромагнитного поля среды, в которой работает прибор, не должна превышать 20 mG, в противном случае прибор должен находиться на расстоянии более, чем 0,3 м от источника излучения.

Следовательно, можно заключить, что если есть возможность числом или математическим выражением нормировать погрешности измерения в зависимости от влияющей величины, то такую влияющую величину необходимо относить к метрологической характеристике. В противном случае внешние электромагнитные помехи можно указывать в пункте «Условия эксплуатации», а остальные факторы – в пункте «Параметры контролируемого объекта, ограничивающие область применения толщиномера».

3. Динамические характеристики средств измерений зависят от принципа действия и конструкции толщиномеров и нормируются при необходимости. Примером динамической характеристики может служить время отклика (при скачкообразном воздействии) – это интервал времени от момента, когда значение величины на входе средства измерений скачкообразно изменяется до определенного уровня (значения), до момента, когда соответствующее показание средства измерений или измерительной системы достигает установившегося конечного значения и остается в заданных пределах.

Для лучшей визуализации материала покажем предлагаемые метрологические характеристики схематично (рисунок 1.5).

Анализ технической и нормативной документации в области метрологических характеристик средств измерений толщины покрытий показал, что ряд метрологических характеристик, указанных в эксплуатационной документации, не в полной мере реализуются в средствах измерений и требуют проведения дополнительных исследований.



Рисунок 1.5 – Схема метрологических характеристик и влияющих величин

### 1.3 Анализ современного состояния исследований и разработок в области магнитных толщиномеров покрытий

#### 1.3.1 Толщинометры покрытий, основанные на магнитных методах

Толщинометры покрытий, основанные на магнитных методах, предназначены для измерения толщины диэлектрических и электропроводящих неферромагнитных покрытий на ферромагнитных основаниях (диапазон толщин от

десятых долей микрометров до десятков миллиметров), толщины ферромагнитных покрытий на электропроводящих неферромагнитных и диэлектрических основаниях (в диапазоне до нескольких десятков микрометров).

Магнитные толщиномеры могут использовать четыре метода измерения: магнитоиндукционный, магнитоиндуктивный, магнитостатический и магнитоотрывной [70]. Однако, толщиномеры, основанные на магнитоиндуктивном и магнитоотрывном методах, в настоящее время практически не применяются, т. к. имеют малый диапазон измерений и большую погрешность измерений в условиях реального разброса физических параметров материалов изделий [71]. Часть средств измерений толщины покрытий имеют универсальное назначение, т. к. сочетают как магнитный метод, так и токовихревой.

В настоящее время выпускается большая номенклатура толщиномеров различного назначения, как в России, так и за рубежом. Остановимся на тех толщиномерах, которые были зарегистрированы в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации [72].

Из зарубежных партнеров ведущие позиции в поставке магнитных толщиномеров покрытий занимают производители из Германии. Например, компания «List-Magnetik GmbH» поставляет серию из девяти моделей толщиномеров типа TOP-CHECK и MEGA-CHECK (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Общий вид толщиномеров, модели:

а) – TOP-CHECK; б) – MEGA-CHECK

Диапазон измерений толщины покрытий для толщиномеров TOP-CHECK составляет от 0 до 5000 мкм; для толщиномеров MEGA-CHECK диапазон

измерения зависит от конкретной модели и может находиться как от 0 до 1000 мкм, так и от 0 до 30000 мкм. Для всех моделей в диапазоне от 0 до 100 мкм установлена абсолютная погрешность, равная 1 мкм. Для больших толщин нормирована относительная погрешность, которая варьируется от 1 до 3 % в зависимости от толщины измеряемого покрытия.

Вторым крупным поставщиком толщиномеров в Россию из Германии является компания «Helmut Fischer GmbH», четырнадцать моделей толщиномеров покрытий которой зарегистрировано в Госреестре средств измерений. Толщинометры DELTASCOPE и PERMASCOPE работают по методу магнитной индукции (Fe). Толщинометры ISOSCOPE работают по методу вихревых токов (NFe). Толщинометры DUALSCOPE совмещают оба этих метода. Общий вид данных толщиномеров покрытий представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 – Общий вид толщиномеров покрытий, модели:  
а) – DELTASCOPE; б) – PERMASCOPE

Толщинометры, работающие по методу магнитной индукции, имеют более широкий диапазон, который достигает от 0 до 7000 мкм у отдельных моделей. Абсолютная погрешность измерения в интервале от 1 до 100 мкм составляет 1 – 1,5 мкм; относительная погрешность находится в пределах 1 – 3 %.

Следующим крупным зарубежным поставщиком толщиномеров покрытий в Россию является Китай. Толщинометры выпускают компании «Beijing TIME High Technology Ltd.», «Shanghai Yihua V&A Instrument Co., Ltd.» и другие. В Госреестре зарегистрированы толщинометры покрытий ТТ210, ТТ260, TIME2510, TIME2500,

TIME2501, TIME2511, TIME2600, VA-TM8042 и другие (рисунок 1.8).



Рисунок 1.8 – Общий вид толщиномеров, модели:

а) – TT210; б) – TT260; в) – TIME 2510

Большая часть выпускаемых толщиномеров являются универсальными. В основу их работы заложен как магнитный принцип, так и токовихревой.

Диапазон измерения у большинства приборов составляет от 15 до 1250 мкм. Относительная погрешность измерения во всем диапазоне составляет порядка 3 %.

Кроме зарегистрированных в Госреестре, на рынке имеется много толщиномеров покрытий, выпускаемых за рубежом. Так, новый толщиномер CARSYS DPM-816 PRO хорошо зарекомендовал себя на рынке США, имея отличные показатели точности с диапазоном измерения до 3500 мкм [73].

Толщиномер покрытий TM-2 представлен на рисунке 1.9. Принцип действия основан на магнитоиндукционном методе неразрушающего контроля толщины покрытий. Диапазон измерений толщины покрытий от 50 до 2000 мкм, а пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений толщины покрытий составляют  $\pm 0,05 \cdot (100 + H)$  мкм, где H – измеренное значение толщины покрытия, мкм. Данный прибор внесен в Государственный реестр средств измерений РФ.



Рисунок 1.9 – Толщиномер покрытий TM-2

Толщиномеры покрытий МТ предназначены для измерений толщины немагнитных диэлектрических покрытий или проводящих немагнитных покрытий, нанесенных на ферромагнитное основание. Принцип действия основан на магнитоиндукционном методе. Пределы допускаемой абсолютной погрешности составляют  $\pm(0,03 \cdot N + 1,5)$  мкм, диапазон измерений толщины покрытий в зависимости от преобразователя имеет следующие значения: от 5 до 2000 мкм и от 100 до 15000 мкм. Данный прибор имеет несколько модификаций, они представлены на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Толщиномеры покрытий МТ

Стоит отметить, что толщиномеры моделей ТТ220 (рисунок 1.11, а) и ТМ-20МГ4 (рисунок 1.11, б) зарегистрированы в федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений [48, 49]. Толщиномер модели ЕТ-111 (рисунок 1.11, в), не зарегистрирован в информационном фонде, но имеет большой спрос во многих интернет-магазинах измерительных приборов популярности среди таких потребителей как автосалоны, страховые компании, мастерские кузовного ремонта [50]. На смену толщиномера ЕТ-111 приходит новая модель ЕТ-555.



Рисунок 1.11 – Внешний вид моделей толщиномеров:

а) – ТТ220; б) – ТМ-20МГ4; в) – ЕТ-111

Магнитные толщиномеры моделей ТТ220, ТТ210 и ТМ-20МГ4, реализующие магнитоиндукционный метод определения толщины покрытий, были использованы в экспериментальных исследованиях настоящей научно-исследовательской работы.

### **1.3.2 Исследования в области магнитной толщинометрии**

Весомый вклад в изучение и становление электромагнитных методов неразрушающего контроля внесли Э.С. Горкунов, А.Л. Дорофеев, А.Г. Ефимов, В.В. Ключев, М.Н. Михеев, Е.В. Щербинин и многие другие учёные и специалисты [75, 76, 77, 78 и др.]. В области электромагнитной толщинометрии исследования проводили Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова, А.И. Потапов, В.А. Сясько, А.Е. Ивкин и другие ученые [2, 60, 70, 71, 74 и др.].

Исследования вихретоковых и магнитоиндукционных толщиномеров покрытий раскрыты в работах Сясько В.А., обобщенных в его диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук [74]. Выполнено теоретическое обоснование применимости методов вихретокового и магнитоиндукционного видов неразрушающего контроля для решения задач по проектированию толщиномеров и проведен анализ контролируемых и мешающих параметров. Однако, исследования факторов, влияющих на точность измерения толщины покрытия (мешающие параметры), регламентированные ГОСТ 31993-2013 [14], ни в стандарте, ни в научной литературе не выявлены.

## **1.4 Выводы по первой главе**

1. Показана актуальность применения покрытий для придания поверхностям изделий коррозионной стойкости, износостойкости, декоративных свойств и т.п. Проведенный анализ нормативной документации и технической литературы выявил различные подходы к классификации покрытий. С точки зрения



метрологического обеспечения измерения толщины покрытий, принята классификация, основанная на сочетании материалов покрытий и оснований.

2. Выявлено, что одним из основных показателей качества покрытия, которое должно соответствовать заданным техническим и экономическим требованиям, является его толщина. В технической документации на детали и изделия указывают минимальное значение толщины покрытий, что не позволяет нормировать верхний предел толщины покрытия и делает контроль односторонним. Кроме того, отсутствие нормированного верхнего предела толщины покрытий приводит к неоправданному перерасходу материала покрытий, энергетическим и другим затратам и не позволяет осуществить выбор средств измерений толщины покрытий в зависимости от точности.

3. Проведен анализ существующих методов контроля толщины покрытий, который показал, что наибольшее применение находят магнитные методы неразрушающего контроля толщины покрытий, поэтому в качестве объекта для дальнейших исследований приняты магнитные толщиномеры покрытий.

4. Проведен анализ элементов метрологического обеспечения измерений толщины покрытий, который выявил, что некоторые элементы метрологического обеспечения достаточно изучены (например, эталоны толщины покрытий), а такие элементы, как средства измерений, вспомогательные средства, методики поверки требуют дополнительных изучений и исследований.

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

6. Анализ толщиномеров покрытий и их характеристик показал, что:

– толщиномеры покрытий, основанные на магнитных методах, выпускаются в достаточном количестве как в нашей стране, так и за рубежом;

– в ряде случаев выявлено несоответствие основных метрологических

характеристик - предела измерений и погрешности измерений;

– в эксплуатационной документации большинства толщиномеров не отражены (или частично приведены) параметры, ограничивающие область применения толщиномеров (допустимая толщина основания, краевой эффект, радиус кривизны измеряемой поверхности и др.). Неполная или недостоверная информация о метрологических характеристиках не гарантирует получение достоверных результатов и вводит потребителей в заблуждение. Поэтому данные положения требуют дальнейших испытаний и исследований.

## ГЛАВА 2. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОБЪЕКТОВ СТАНДАРТИЗАЦИИ В ОБЛАСТИ МАГНИТНОЙ ТОЛЩИНОМЕТРИИ

К объектам стандартизации в области измерений толщины покрытий относятся: термины и определения; технические условия и технические требования к средствам измерения толщины, устройствам и образцам; параметры и размеры; типы и марки; конструкции толщиномеров и образцов; методы испытаний; методы и средства поверки мер и толщиномеров; правила эксплуатации и ремонта; правила маркировки, транспортировки и хранения, нормы точности и т.п. [74, 79]. Данные объекты стандартизации не противоречат, а скорее дополняют те элементы метрологического обеспечения, которые устанавливает ГОСТ Р 8.820-2013 [41]: методики измерений, поверки, испытаний.

Актуальность данного направления подтверждается наличием отдельных международных стандартов и национальных стандартов промышленно развитых стран: США, Великобритании, Франции, Италии, Германии и Японии [74].

Существует достаточно много стандартов и нормативных документов организаций, которые развивают и конкретизируют основные положения национальных стандартов. Однако ряд нормативных документов по структуре и содержанию не соответствуют действующим национальным стандартам. Кроме того, национальные стандарты в области магнитной толщинометрии, либо отсутствуют, либо давно не пересматривались.

Это же упущение прослеживается и по качеству, достоверности и полноте эксплуатационной документации, которая доводится до потребителя через паспорт средства измерений, руководство по эксплуатации, публикации и т. п.

Толщиномеры покрытий должны проходить поверку с целью определения соответствия средств измерения установленным метрологическим требованиям во всем диапазоне измерения прибора. Для поверки применяются соответствующие средства, воспроизводящие и передающие размер единицы длины. Эти средства

поверки должны обеспечивать возможность измерения передаваемого ими размера толщины покрытия поверяемыми толщиномерами. Эта особенность поверки толщиномеров покрытий приводит к необходимости специфического подхода к их метрологическому обеспечению [2, 31].

## **2.1 Нормирование точности толщины покрытий**

Выбор средств измерений, удовлетворяющих метрологическим и экономическим требованиям, – одна из основных задач метрологического обеспечения производства, которая решается при взаимодействии конструкторской, технологической и метрологической служб организации. Обоснованный выбор средств измерений по точности возможен в том случае, если измеряемый параметр имеет установленные нормы точности.

Под точностью понимается степень приближения значения параметра изделия, процесса и т.п. к его заданному значению. Нормирование точности заключается в указании возможных отклонений от заданного значения.

Толщину покрытий часто относят к линейным размерам, но из-за ряда специфических отличий систему допусков на линейные размеры невозможно перенести на толщину покрытий. Поэтому целесообразность установления в нормативных документах оптимальных предельных размеров и допусков на толщину покрытий является актуальной задачей, что отмечалось в работах [2, 33 и другие].

В настоящее время систематизация в стандартизации способствует созданию и широкому применению на практике системы нормирования стандартных требований к точности различных объектов, разработаны системы допусков (система допусков углов, система допусков формы и расположения), а для сопрягаемых поверхностей – система допусков и посадок.

Система, регламентирующая допуски на толщину покрытий в настоящее время отсутствует, что не позволяет системно нормировать точность толщины

покрытий в нормативной документации, осуществлять выбор толщиномеров по точности и эффективно решать практические задачи контроля толщины покрытий.

### **2.1.1 Основы нормирования точности геометрических отклонений поверхностей**

Форма разных изделий может быть представлена в виде сочетания различных поверхностей, как правило, это цилиндр и плоскость. ГОСТ 25346-2013 [31] и ГОСТ 25347-2013 [82] регламентируют Систему допусков линейных размеров, в которой при нормировании точности размеров рассматриваются два размерных элемента: цилиндр и две параллельные противоположащие плоскости, которые характеризуют плоские поверхности деталей. Так как размеры данных элементов выражаются в единицах длины, то они стандартизованы как линейные размеры. Их точность нормируется Системой допусков линейных размеров, базирующейся на Международной системе допусков и посадок, и показавшей свою высокую эффективность для проектирования технических изделий на протяжении почти века её применения без внесения существенных изменений [83].

Системой допусков линейных размеров установлены стандартные значения допусков, зависящие от номинального размера и качества точности (предусмотрено 20 качеств точности от IT01 до IT18). В качествах, начиная с IT6, значения допусков увеличиваются в 10 раз при переходе с данного качества на пять качеств грубее. Это правило распространяется на все допуски системы и может быть применено для получения значений допусков более грубых качеств.

Допуски рассчитаны по среднему значению интервала номинальных размеров, а сами интервалы подобраны так, чтобы допуски для их крайних значений не отличались от расчетного значения в основном не более чем на 5-8 % [84]. Процентное соотношение прироста допуска в пределах интервала номинальных размеров к его значению для шестого и восьмого качеств в

диапазоне размеров до 500 мм представлено на рисунке 2.1. Видно, что в интервалах номинальных размеров прирост допуска от интервала к интервалу носит стабильный характер. Скачки процентного соотношения объясняются необходимостью округления стандартных допусков до целых значений микрометров.

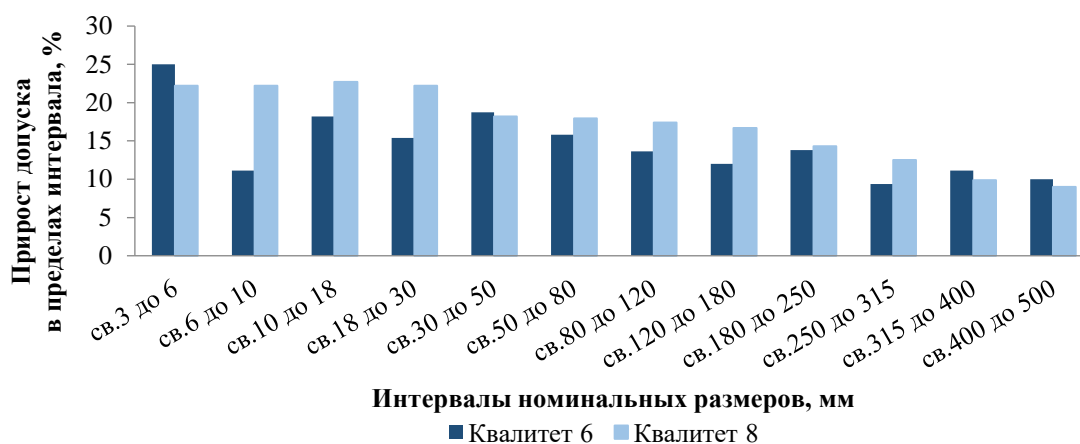


Рисунок 2.1 – Прирост допуска по интервалам номинальных размеров в Системе допусков линейных размеров

Для оценки годности размера при измерении нормированного значения допуска недостаточно, необходимо знать значения предельных размеров, которые зависят от класса допуска.

В класс допуска включается информация о значении допуска и основного отклонения относительно номинального размера размерного элемента. Значения основных отклонений валов и отверстий тоже нормированы в Системе допусков, это позволяет определять предельно допустимые размеры и делать заключение о годности контролируемого размерного элемента.

Нормирование точности формы и расположения поверхностей заключается в указании допустимых значений, которые не должны превышать реальные отклонения формы и расположения от их идеального состояния.

Нормирование точности формы и расположения поверхностей регламентируется ГОСТ 24643 – 81 [85] и ГОСТ Р 53442-15 [86]: для всех видов допусков формы и расположения принят единый основной ряд числовых значений,

который определен на основе ряда предпочтительных чисел R10 с округлением некоторых значений до чисел, удобных для отсчета по шкалам измерительных приборов (например, 3,2 округлено до 3 и 6,3 до 6).

Для каждого вида допуска формы и расположения поверхностей установлено 16 степеней точности: числовые значения допусков увеличиваются от одной степени к другой (с возрастающим коэффициентом 1,6, что соответствует предпочтительному ряду R5) и образованы из части числовых значений основного ряда.

Числовые значения допусков формы и расположения в пределах одной степени точности изменяются по определенной закономерности в зависимости от вида допуска формы или расположения. Например, числовые значения допусков цилиндричности, круглости и профиля продольного сечения размеров до 250 мм изменяются пропорционально  $\sqrt[3]{D}$ , где D – среднегеометрическое крайних значений интервала номинальных размеров. Интервалы номинальных размеров в данном случае выстроены аналогично Системе допусков линейных размеров, что облегчает увязку допусков формы с допусками размера, но для допусков плоскостности и прямолинейности интервалы номинальных размеров приняты по ряду R5.

На рисунке 2.2 показано процентное соотношение прироста допуска в пределах интервала для 6-й и 8-й степеней точности допусков круглости, цилиндричности и профиля продольного сечения, оно носит стабильный характер.

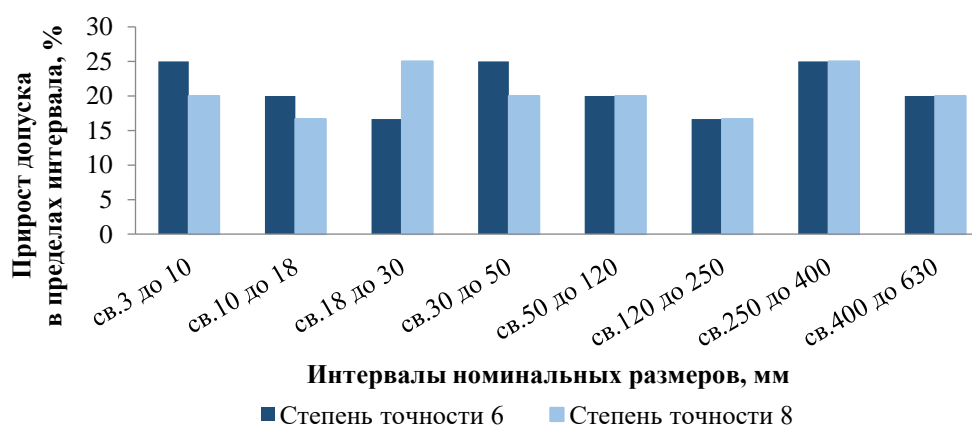


Рисунок 2.2 – Прирост допуска по интервалам номинальных размеров в Системе допусков формы и расположения

Стандартом установлена связь между точностью размеров деталей (кавалитетом) и точностью формы или расположения поверхностей (степенью точности).

Допуск формы поверхности не может быть больше допуска на размер этой поверхности. Таким образом, для нормирования точности формы используется часть от допуска на размер. Стандарт устанавливает следующие уровни относительной геометрической точности формы:

А – нормальная относительная геометрическая точность; допуски формы или расположения составляют примерно 60 % допуска размера;

В – повышенная относительная геометрическая точность; допуски формы или расположения составляют примерно 40 % допуска размера;

С – высокая относительная геометрическая точность; допуски формы или расположения составляют примерно 25 % допуска размера.

Нормировать точность шероховатости поверхности – это значит установить допускаемые значения микронеровностей на рассматриваемых поверхностях. Критерии оценки шероховатости и их допустимые значения устанавливает ГОСТ 2789-73 [87].

Числовые значения параметров шероховатости выбираются из ряда предпочтительных чисел R10. Нормирование числовых значений параметров шероховатости осуществляется либо предельными значениями параметра, либо номинальным значением с указанием отклонений в процентах односторонне, либо симметрично.

### **2.1.2 Анализ нормативной документации, регламентирующей толщину покрытий**

Прежде, чем приступать к нормированию толщины покрытий необходимо знать, какие значения толщины покрытий применяются на практике и чем руководствуются разработчики при указании толщины в конструкторской



документации. Рассмотрим основные стандарты Единой системы защиты от коррозии и старения.

В зависимости от вида покрытий, условий эксплуатации (в том числе, учитывая и климатические условия) изделий ГОСТ 9.303-84 [9] устанавливает толщину защитных и защитно-декоративных покрытий на поверхности деталей из углеродистой стали в пределах от 6 до 30 мкм; по коррозионностойкой стали - от 3 до 24 мкм; по чугунам – от 3 до 40 мкм; по меди и медным сплавам – от 1 до 18 мкм. Примерно такие же рекомендации по толщине покрытий ГОСТ 9.303-84 [9] приводит для алюминиевых, цинковых, титановых и др. сплавов.

Стандарт приводит рекомендации по назначению толщины покрытий для деталей, сопрягаемых по различным посадкам, и для резьбовых деталей.

В большей части стандарт устанавливает минимальную толщину покрытий. Там, где приведен интервал толщин, конкретную минимальную толщину покрытия в указанных пределах уточняют в нормативно-технической документации с учетом специфики изделия и технологии получения покрытия.

Диапазоны толщин различны для каждой группы покрытий, например, золото и др. нормируются от 0,1 до 6 мкм, серебро от 0,5 до 12 мкм, хром от 1 до 60 мкм, хотя ГОСТ 9.303-84 [9] не исключает возможности расширения этих диапазонов.

ГОСТ 9.304-87 [16] устанавливает общие требования к покрытиям, наносимым газотермическим напылением, и регламентирует минимальную толщину покрытий от 80 до 250 мкм в зависимости от вида покрытия и срока эксплуатации. Для контроля толщины покрытий ГОСТ 9.304-87 [16] рекомендует использовать магнитные толщиномеры с диапазоном измерения от 0 до 500 мкм с относительной погрешностью измерения не более 10 %.

Минимальную толщину защитных и защитно-декоративных анодно-окисных покрытий, получаемых на поверхности полуфабрикатов из алюминия и его сплавов устанавливает ГОСТ 9.031-74 [15]. Стандарт нормирует минимальную толщину покрытий от 9 до 30 мкм, зависящую от типа покрытия и параметров коррозионной

агрессивности атмосферы.

Толщина цинковых покрытий, получаемых методом горячего цинкования, нормируется ГОСТ 9.307-89 [17] в пределах не менее 40 мкм и не более 200 мкм. Средства измерений для контроля толщины покрытий допускаются с погрешностью измерения не более  $\pm 10\%$ . Контроль толщины покрытий стандарт рекомендует осуществлять магнитными методами, в качестве арбитражного контроля – металлографический.

Толщина алюминиевых горячих покрытий по ГОСТ 9.315-91 [18], наносимых методом погружения в расплав строительных конструкций, листовой стали, труб и т.п., может находиться в пределах от 50 до 200 мкм. Конкретное значение толщины покрытия указывается в технических условиях на изделие. Относительная погрешность магнитного метода измерения не должна превышать  $\pm 10\%$ .

Нанесение металлических и неметаллических неорганических покрытий на пластмассы имеют свои особенности. Общие требования к таким покрытиям установлены в ГОСТ 9.313-89 [30]. Толщина покрытия зависит от конкретных условий эксплуатации и должна составлять от 3 до 24 мкм.

Толщину лакокрасочных покрытий устанавливает ГОСТ 9.105-80 [12]. При нанесении лакокрасочного покрытия жидким диспергированным материалом предельные значения толщины одного слоя должны быть в пределах от 6 до 50 мкм, при нанесении покрытия порошковым материалом - до 250 мкм. Величина толщины лакокрасочного покрытия соизмерима с толщиной металлических покрытий. Поэтому при нормировании точности толщины покрытий возможна выработка единых рекомендаций.

На практике часто используют многослойные покрытия. Например, толщина лакокрасочного покрытия элементов кузова автомобилей находится в пределах 70 – 240 мкм и варьируется в зависимости от марки производителя: BMW - от 90 до 165 мкм; Citroen – от 85 до 150 мкм; Ford – от 105 до 235 мкм; Hyundai – от 70 до 150 мкм; Lexus – от 125 до 175 мкм и т. д. [26, 34]. Научно доказано, что толщина

лакокрасочной пленки в 90 мкм для ряда покрытий является критической отметкой, ниже которой существенно снижаются эксплуатационные и физико-механические свойства покрытия и, как следствие, возможно проявление различных видов коррозионных разрушений. Значение толщины более 500 мкм может приводить к самопроизвольному растрескиванию покрытий.

Крупнейший производитель металлосайдинга Grand Line изготавливает панели толщиной 0,45 или 0,5 мм, толщина их покрытия от 25 до 200 мкм [27].

В различных отраслях производства применяются полимерные покрытия [28, 35], для которых определены следующие толщины: полиэфирная эмаль от 25 до 30 мкм; сложный полиэфир (для бытовой техники) от 25 до 35 мкм; полиуретан от 30 до 50 мкм; пластизоль от 100 до 250 мкм.

Для защиты стальных магистральных трубопроводов диаметром от 273 до 1420 мм при заводском исполнении покрытия наносят толщиной от 0,3 до 3,5 мм [29], при базовом или трассовом она может достигать 6 мм.

Проведённый анализ показал, что толщина большинства рассмотренных видов покрытий и изделий с такими покрытиями составляет от 1 до 300 мкм. Только ряд драгоценных металлов и их сплавов имеют толщину покрытий менее 1 мкм. Большие толщины встречаются крайне редко и могут достигать 6 мм.

В технической документации приводится минимальное значение толщины покрытий, значения допусков в явном виде не выявлены. ГОСТ 9.303-84 [9] для отдельных групп покрытий приводит как минимальную толщину, так и максимальную. Приняв их за наибольшее и наименьшее значения толщины можно говорить о допустимом разбросе действительных значений при оценке годности измеряемого параметра. Однако, такой набор значений толщины не поддается систематизации и носит рекомендательный характер при создании конструкторской документации.

Большая часть рассмотренных стандартов (за исключением ГОСТ 9.307-89 [17], ГОСТ 9.315-91 [18] и др.) не позволяет сделать обоснованный выбор средств измерений исходя из точности толщиномеров.

### 2.1.3 Разработка рекомендаций по созданию системы допусков на толщину покрытий

Анализ ряда систем допусков и посадок подтверждает, что они построены единообразно, на некоторых общих принципах, позволяющих структурировать систему при ее создании и оперативно разобраться при изучении системы. Количество, последовательность и содержание принципов построения системы допусков у разных авторов может быть свое. Так авторы работы [89] Систему допусков на линейные размеры описывают четырьмя принципами. Для толщины покрытий приемлем первый принцип – наличие квалитетов и формулы для расчета допусков и четвертый принцип, который устанавливает нормальную температуру.

Авторы работы [84] приводят семь принципов построения Системы допусков и посадок. К нормированию толщины покрытий можно использовать четыре принципа: температурный режим, наличие квалитетов допуска, единица допуска и интервалы размеров.

Названия семи принципов построения Системы допусков и посадок в работе [90] отличаются от названий, приведенных ранее, однако по смыслу они отражают содержание данной системы.

Аналогичные принципы можно встретить и в других источниках, но они, как правило, дублируют вышеприведенные.

Систему допусков толщины покрытий предлагаем характеризовать следующими принципами:

**1. Принцип предпочтительности.** Это один из основных принципов стандартизации, назначение которого состоит в создании необходимого разнообразия стандартных решений при ограничении использования их номенклатуры. Качественный аспект этого принципа больше подходит для образования посадок. Для нормирования допусков используем количественный аспект принципа предпочтительности, который связан с построением рядов предпочтительных чисел Ренара по ГОСТ 8032-84, предусматривающий четыре

основных ряда - R5, R10, R20 и R40.

Для построения рядов допусков принимаем ряд R10, использование которого апробировано при нормировании допусков формы и расположения поверхностей (ГОСТ 24643 – 81 [85]) и показало достаточность значений ряда для практического применения. Для удобства отсчета по шкалам измерительных приборов некоторые значения округлены по аналогии с допусками формы и расположения.

В таблице 2.1 представлены значения, которые распространяются как на толщину покрытия, так и на допуски.

Таблица 2.1 – Ряд размеров, мкм

0,1	0,12	0,16	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8
1	1,2	1,6	2	2,5	3	4	5	6	8
10	12	16	20	25	30	40	50	60	80
100	120	160	200	250	300	400	500	600	800
1000	1200	1600	2000	2500	3000	4000	5000	6000	8000
10000									

Данный ряд числовых значений допускается продолжать в сторону меньших или больших значений при соблюдении закономерности построения ряда.

В отдельных случаях можно пользоваться рядом R5, что позволит в два раза уменьшить количество значений в ряду (увеличить шаг ряда).

**2. Температурный режим.** Данный принцип означает то, что стандартные допуски и требования к точности изготовления в конструкторской документации устанавливаются для нормальной температуры, величина которой нормирована ГОСТ 8.050-73 наряду с другими влияющими величинами. Это обосновано необходимостью получения объективной оценки при заключении о годности измеряемого параметра. Требования по температурному режиму относятся как к измеряемой детали, так и к средству измерения. Этот принцип обеспечивает инвариантность (неизменность) требований в данной системе допусков на толщину покрытий.

**3. Установление уровней относительной точности.** Для решения различных конструкторских задач необходимы допуски разной точности.

Например, точность нанесения покрытий на сопрягаемые поверхности деталей существенно выше точности нанесения декоративных покрытий.

В любой системе допусков и посадок установлены уровни относительной точности, которые используются для назначения «одинаково точных» допусков однотипных параметров с разными номинальными значениями. Названия в разных системах допусков разные: квалитеты (Система допусков на линейные размеры), степени точности (допуски формы и расположения поверхностей, зубчатые колеса и др.) и классы точности (подшипники качения, общие допуски).

Уровень относительной точности толщины покрытий предлагается называть степенью точности.

В системе допусков на толщину покрытий предлагается установить 5 степеней точности. Это не создаст ограничений при нормировании толщины в зависимости от вида покрытий, от технологии его нанесения, от сложности деталей и других факторов. 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 2.2.

#### **4. Наличие интервалов номинальных значений толщины покрытий.**

В каждой системе допусков стандартная величина допуска устанавливается не для каждого номинального размера, а для определенного интервала. В Системе допусков на линейные размеры интервалы построены так, что допуски от интервала к интервалу увеличиваются на 10 – 20 % (см. рисунок 2.1). В Системе допусков формы и расположения используются разные подходы. Например, интервалы номинальных размеров для допусков плоскостности построены по ряду R5, а интервалы для допусков круглости и цилиндричности построены по аналогии допусков на размеры.

Для построения системы допусков для толщины покрытий сначала

необходимо определить нормируемый диапазон толщины покрытий. Проведенный выше анализ показал, что самые тонкие покрытия (0,1, 0,25, 0,5 мкм) относятся к драгоценным металлам и их сплавам (ГОСТ 9.303-84 [9]). Толщина защитных покрытий стальных магистральных трубопроводов может достигать 6 мм [29].

Авторы работы [5] приводят следующую классификацию покрытий по толщине: ультратонкие, толщиной менее 1 мкм; высокотонкие – от 1 до 10 мкм; микротонкие – от 10 до 40 мкм; миллитонкие – от 40 до 300 мкм; тонкие – от 300 до 1000 мкм; средние – от 1 до 3 мм; толстые – от 3 до 8 мм и сверхтолстые – более 8 мм. Данная классификация в интервалы номинальных значений толщины покрытий не вписывается, но верхнее значение, равное 8 мм, необходимо учесть.

Таким образом, нормируемый диапазон толщины покрытий принимаем от 0,1 до 8000 мкм.

Для построения интервалов номинальных значений толщины покрытий принимаем ряд R5. Получим следующие значения интервалов (в мкм): до 1; свыше 1 до 1,6; свыше 1,6 до 2,5; свыше 2,5 до 4,0; свыше 4 до 6; свыше 6 до 10; свыше 10 до 16; свыше 16 до 25; свыше 25 до 40; свыше 40 до 60; свыше 60 до 100; свыше 100 до 160; свыше 160 до 250; свыше 250 до 400; свыше 400 до 600; свыше 600 до 1000; свыше 1000 до 1600; свыше 1600 до 2500; свыше 2500 до 4000; свыше 4000 до 6000; свыше 6000 до 10000.

Единицу допуска  $i$  в пределах одной степени точности определим как среднеарифметическое из крайних значений интервалов номинальных значений толщины покрытий.

**5. Формирование стандартных допусков толщины покрытий.** Данный принцип осуществляется на базе двух предыдущих, при этом использован принцип формализации допусков, применяемый в различных системах допусков и позволяющий «отделить» допуск от поля допуска. Такие допуски определяют только допустимые рассеяния нормируемых параметров.

Для сравнения, в Системе допусков на линейные размеры ряды допусков построены в виде массива, где числовое значение допуска установлено в

соответствии с интервалом номинальных размеров и качеством точности; а в Системе допусков формы и расположения поверхностей приведены несколько массивов значений допусков, в том числе допуски, связанные со значениями номинальных параметров и уровнями точности.

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 2.2.

Таблица 2.2 – 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

Значения допусков для размеров толщины покрытий менее 1 мкм допускается корректировать как в меньшую сторону, так и в большую исходя из производственной необходимости и технологических возможностей.



Числовые значения допусков толщины покрытий, не предусмотренные настоящими рекомендациями, являются специальными. Допускается применять их, если они предусмотрены в других стандартах для соответствующих видов продукции.

Покажем, на сколько отличаются допуски на толщину покрытия при переходе от одного интервала толщины к другому. Для этого отнесем прирост допуска к самому допуску. Процентное соотношение прироста допусков для второй и четвертой степеней точности по всем интервалам приведено на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Прирост допуска на толщину покрытий по интервалам

Сравнивая аналогичные представления для Системы допусков линейных размеров (рисунок 2.1) и для Системы допусков формы и расположения (рисунок 2.2), можно заключить, что предложенное представление допусков на толщину покрытий, приведенное в таблице 2.2, имеет качественное совпадение с системами, которые хорошо себя зарекомендовали как в национальных, так и в международных стандартах.

Разброс прироста допусков от интервала к интервалу объясняется округлением расчетных значений до ближайших из ряда R10.

**6. Нормирование поля допуска.** Измерительный контроль большинства параметров осуществляется путем нахождения с помощью средств измерения действительного значения параметра и принятия решения о его годности. При контроле линейных размеров параметр считается годным, если действительное значение размера находится между наибольшим и наименьшим предельными размерами или равен им. Следовательно, допуск должен быть привязан к номинальному размеру.

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 толщину покрытия расположить относительно номинального размера односторонне в плюс (рисунок 2.4).

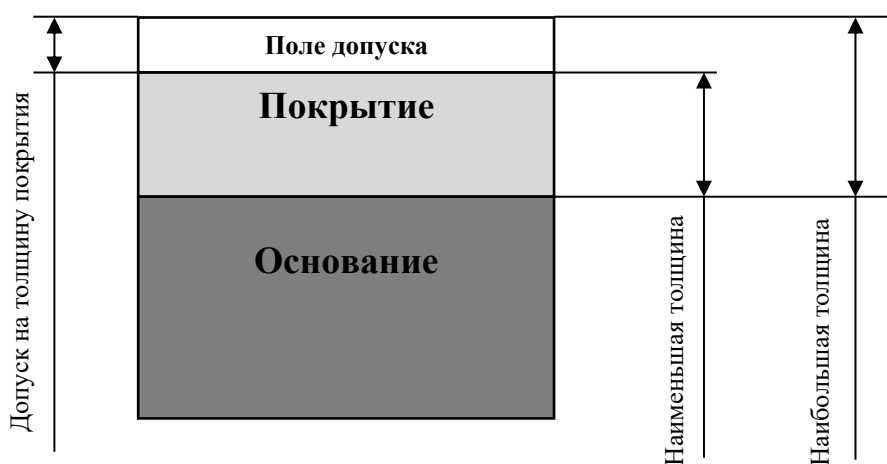


Рисунок 2.4 – Схема расположения поля допуска на толщину покрытия

Таблицы с предельными отклонениями создавать нецелесообразно, т.к. нижнее отклонение всегда равно нулю, а верхнее отклонение положительное и равно по величине допуску на толщину покрытия.

Разработанные рекомендации по созданию системы допусков на толщину покрытий, основанные на представленных выше принципах, позволяют:

- объективно оценивать годность изделий по толщине покрытий при их нанесении. Заниженные значения износостойких покрытий приведут к

преждевременному нарушению функциональных свойств детали при эксплуатации, а чрезмерное превышение толщины покрытия связано с перерасходом материалов покрытий, рабочего времени, энергии и т.п.;

– эффективно решать практические вопросы при выборе толщиномеров по точности.

Предложенные рекомендации не противоречат стандартам Единой системы защиты от коррозии и старения. Все рекомендации по выбору минимального значения того или иного вида покрытий следует относить к номинальной толщине покрытия. Наличие пяти степеней точности позволяют в широком диапазоне назначать допуск на толщину покрытия в зависимости от технологических возможностей изготовителя.

В результате проведенных исследований и на основе предложенных рекомендаций была разработана методика определения допусков на толщину покрытий, которая представлена в Приложении А.

Основные положения системы допусков на толщину покрытий внедрены в учебный процесс ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Акт внедрения представлен в Приложении Б.

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы по нормированию толщины покрытий и поверке магнитных толщиномеров АО «НПП «Радиосвязь»» представлен в Приложении В.

Для практической реализации проведенных исследований и создания системы допусков на толщину покрытий планируется разработка проекта предварительного национального стандарта РФ «Основные нормы взаимозаменяемости. Толщина покрытий. Установление геометрических допусков» и включение его в Программу национальной стандартизации РФ на 2024 год.

## 2.2 Совершенствование методики поверки толщиномеров покрытий

### 2.2.1 Анализ нормативной документации на методику поверки магнитных толщиномеров

Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» [62] устанавливает обязательное проведение поверки средств измерений, как одного из элементов обеспечения единства измерений, гарантирующего нахождение средства измерения в нормированном точностном диапазоне метрологических характеристик и его пригодности для последующей эксплуатации. Поверка средств измерений осуществляется до их ввода в эксплуатацию или после их ремонта (первичная поверка), или находящиеся в эксплуатации (периодическая поверка). Если средства измерений не предназначены для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, то их поверка осуществляется в добровольном порядке.

Виды работ, необходимые при поверке каждого типа средств измерений, определяются методикой поверки, которая представляется при утверждении типа средств измерений и используется при их поверке.

Нормативную документацию на методики поверки можно разделить на три группы:

- нормативные документы на поверку любых средств измерений;
- нормативные документы на поверку толщиномеров покрытий;
- действующие методики поверки толщиномеров, утвержденные при регистрации средств измерений или приведенные в эксплуатационной документации.

**К нормативным документам первой группы** можно отнести ГОСТ Р 8.973-2019 [95] и РМГ 51-2002 [96]. ГОСТ Р 8.973-2019 [95] устанавливает общие требования к содержанию и оформлению стандартов на методики поверки в следующих случаях:

– когда группа средств измерений объединена стандартом технических условий или технических требований, в котором установлены единые обязательные требования к средствам измерений данной группы, в том числе метрологические;

– когда стандарт содержит описание методики поверки и используется как ссылочный документ при разработке методики поверки на конкретное средство измерений.

РМГ 51-2002 [96] дополнительно можно использовать и для разработки методик поверки, представляемых на испытания с целью утверждения типа средств измерений.

**К нормативным документам второй группы**, требования которых распространяются на поверку толщиномеров покрытий, можно отнести ГОСТ 8.502-84 [63], распространяющийся на радиоизотопные толщиномеры покрытий по ГОСТ 22555-77 и на магнитные и вихретоковые толщиномеры покрытий по ГОСТ 25335-82. Последний стандарт отменен, а ГОСТ 22555-77 заменен на ГОСТ 18061-90 «Толщиномеры радиоизотопные. Общие технические условия» [97], который распространяется на два типа: радиоизотопные толщиномеры листовых и ленточных материалов и радиоизотопные толщиномеры покрытий. Следовательно, вводная часть ГОСТ 8.502-84 [63] требует переработки.

Учитывая то, что при разработке стандарта на методику поверки по ГОСТ Р 8.973-2019 [95] и РМГ 51-2002 [96] в обоснованных случаях допускается объединять или исключать отдельные разделы, то структуру основной части ГОСТ 8.502-84 [63] можно признать удовлетворительной, но по содержанию основной части имеются замечания. Рассмотрим их подробнее.

Методика поверки толщиномеров покрытий по ГОСТ 8.502-84 [63] предусматривает выбор трех мер в каждом диапазоне измерения и проведение на каждой мере по пять наблюдений (измерений). Основную погрешность проверяемого толщиномера определяют как сумму систематической и случайной составляющих погрешности.

Систематическую погрешность  $\tilde{\Delta}_c$  определяют как среднее арифметическое из пяти значений текущих погрешностей

$$\tilde{\Delta}_c = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta_i \quad (2.1)$$

где  $\Delta_i = h_n - h_i$ ;

$h_n$  - номинальное значение толщины меры;

$h_i$  – показания поверяемого толщиномера при  $i$ -том наблюдении.

Следует, что от номинального значения вычитается действительное. Но необходимо отметить, что на самом деле при определении отклонения [31] или погрешности [69] от действительного (искомого) вычитается номинальное (базовое) значение и это влияет на знак рассчитываемой величины.

Кроме того, ГОСТ Р 8.736-2011 [69], ГОСТ 18061-90 [97] и др. рекомендуют рассчитывать среднее значение измеряемых величин, а затем определять систематическую составляющую основной погрешности. Такой подход позволяет сократить количество операций при вычислениях.

Случайную погрешность  $\Delta^\circ$  определяют путем умножения коэффициента Стьюдента  $t$  на среднее квадратичное отклонение  $\sigma$  случайной составляющей погрешности, которое определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (\Delta_i - \tilde{\Delta}_c)^2} \quad (2.2)$$

При доверительной вероятности  $P = 0,95$  и числе наблюдений (измерений)  $n = 5$  коэффициент Стьюдента  $t = 2,78$ .

При оценке случайной величины (по аналогии с ГОСТ Р 8.736-2011 [69]) вместо среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  группы, содержащей  $n$  результатов измерений, необходимо использовать среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины)  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Основная погрешность по ГОСТ 8.502-84:

$$\Delta = \tilde{\Delta}_c + \Delta^\circ \quad (2.3)$$

При этом рассмотрим ситуацию, когда систематическая составляющая погрешности имеет отрицательное значение, а случайная – положительное. Получается, что основная погрешность при этом стремится к нулю, а ведь это неверно. Некорректность данного выражения заключается в том, что случайная составляющая погрешности может быть как со знаком «плюс», так и со знаком «минус».

Справедливость данных замечаний подтверждает методика испытаний толщиномеров, приведенная в ГОСТ 18061-90 [97].

**К нормативным документам третьей группы** относятся методики поверки серийно выпускаемых толщиномеров. Рассмотрим методики поверки толщиномеров покрытий, выбранные для дальнейших исследований.

*Методика поверки МП 002.Д4-14*, которая распространяется на толщиномеры покрытий ТМ-2, ТМ-3, ТМ-4, ТМ-4Т, предусматривает оценку погрешности измерений на пяти мерах, значения толщины которых равномерно распределены по диапазону измерений прибора. На каждой мере выполняются по пять измерений толщины покрытий (в четырех точках зоны по окружности диаметром 20 мм и в пятой точке в центре). Далее вычисляется среднее арифметическое значение толщины  $X_{II}$  каждой измеренной меры по формуле:

$$X_{II} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i, \quad (2.4)$$

где  $X_i$  – измеренные значения толщины меры в  $i$ -ой точке.

Здесь и далее обозначения параметров приводятся так, как они даны в рассматриваемых методиках.

Абсолютную погрешность измерения толщины  $\Delta X$  каждой измеренной меры определяют по формуле:

$$\Delta X = X_{II} - X_H, \quad (2.5)$$

где  $X_H$  – номинальное значение толщины меры, указанное в свидетельстве о ее поверке.

Толщиномер покрытий считается прошедшим поверку с положительным результатом, если абсолютная погрешность измерения толщины покрытий не превышает допустимой.

Данная методика не учитывает случайные погрешности измерения, которые присутствуют при измерении толщины покрытий. При таком подходе повышается критерий достоверности поверки  $P_{\text{взм}}$ , который регламентирует наибольшую вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра толщиномера [98].

**Методика МП 159-261-2016** поверки толщиномеров покрытий SaluTrjn предусматривает измерения толщины покрытий «не менее трех раз», рассчитывая абсолютную погрешность  $\Delta_i$  для каждого раза измерений по формуле:

$$\Delta_i = h_i - h_{0i}, \quad (2.6)$$

где  $h_i$  –  $i$ -тое значение толщины покрытия, измеренное толщиномером;

$h_{0i}$  –  $i$ -тое действительное значение толщины меры.

Для положительного заключения по поверке толщиномера все полученные значения абсолютной погрешности должны находиться в допусках пределах. Данная методика не устанавливает конкретное число измерений (наблюдений), что приведет к неоднозначным результатам из-за случайных составляющих погрешности измерения.

### **2.2.2 Разработка рекомендаций по совершенствованию методики поверки магнитных толщиномеров**

В методику поверки толщиномеров покрытий по ГОСТ 8.502-84 [63] предлагается внести следующие изменения:



1. Систематическую погрешность следует определять по формуле:

$$\tilde{\Delta}_c = h_c - h_n, \quad (2.7)$$

где  $h_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$  – среднее арифметическое значение измерений толщины меры.

2. При определении случайной погрешности необходимо использовать среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценку измеряемой величины)  $\sigma_x$ .

Тогда случайная погрешность равна:

$$\Delta^\circ = t \sigma_x, \quad (2.8)$$

где  $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_c)^2}{n(n-1)}}$ .

3. Основную погрешность толщиномера покрытий необходимо определять по следующей формуле:

$$\Delta = \tilde{\Delta}_c \pm \Delta^\circ \quad (2.9)$$

Кроме того, в методику поверки необходимо внести операцию по определению размеров образцов мер, прилагаемых к толщиномеру, т.к. калибровка толщиномера в процессе его эксплуатации проводится именно по этим образцам. Маркировка на образцах должна содержать его номинальную толщину и предельно-допустимые значения отклонений толщины.

Сравним рассматриваемые методики поверки: методику МП 002.Д4-14; методику МП 159-261-2016; методику по ГОСТ 8.502-84 [63] и методику по ГОСТ 8.502-84 [63] с указанными предложениями.

Примем толщину меры 200 мкм, предел допустимой погрешности  $\pm 6$  мкм (см. методику МП 159-261-2016). Измеренные при поверке значения толщины покрытия равны, мкм: 202, 193, 200, 202, 199. Результаты расчета основной погрешности сведем в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 - Основная погрешность измерения толщины покрытия при разных методиках поверки

Измеренное значение толщины покрытия, мкм		Методика поверки толщиномеров покрытий							
		МП 002.Д4-14	МП 159-261-2016	ГОСТ 8.502-84			С корректировкой ГОСТ 8.502-84		
				$\Delta X$	$\Delta_i$	$\Delta_i$	$\Delta^\circ$	$\Delta$	$h_i$
$h_1$	202	$\Delta X = X_{И} - X_{Н}$	+2	-2	$t = 2,78$	-	202	$t = 2,78$	-
$h_2$	193		-7	+7			193		-
$h_3$	200		0	0			200		-
$h_4$	202		+2	-2			202		-
$h_5$	199		-1	+1			199		-
$\Sigma$	996	-	-	4	-	-	996	-	-
Среднее арифметическое	199,2	-	-	0,8	-	-	199,2	-	-
Погрешность, мкм	-	-0,8	-7	$\tilde{\Delta}_c = +0,8$	$\Delta^\circ = 10,3$	$\Delta = 11,1$	$\tilde{\Delta}_c = -0,8$	$\Delta^\circ = \pm 4,6$	$\Delta = -5,4$
Заключение по поверке		Соответствует	Не соответствует	Не соответствует			Соответствует		

Результаты расчетов представлены на рисунке 2.5.

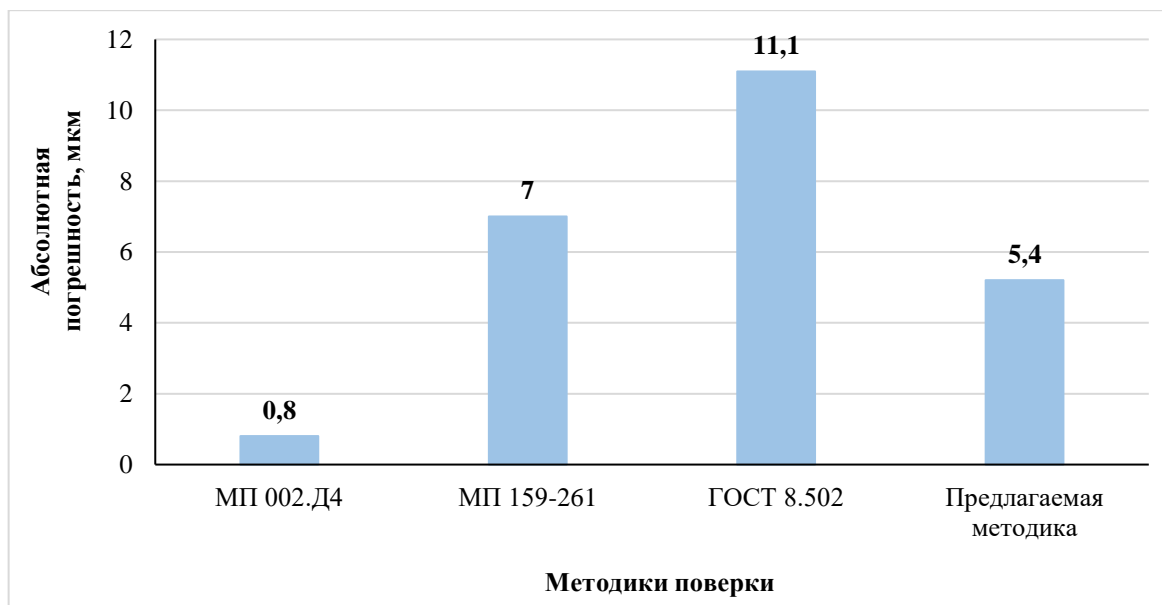


Рисунок 2.5 - Абсолютное значение погрешностей толщиномеров, определенных по разным методикам поверки

Анализируя произведённые расчеты (таблица 2.3), можно заключить:

1. Методика МП 002.Д4-14 существенно занижает значение погрешности при

поверке толщиномера. В рассматриваемом примере погрешность прибора составила 0,8 мкм.

В случае симметричного расположения показаний прибора относительно номинального значения меры в результате поверки окажется толщиномер с нулевой погрешностью.

При данной методике поверки высокая вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра толщиномера.

2. В результате поверки по методике МП 159-261-2016 толщиномер покрытий признается дефектным из-за того, что один результат измерений превышает допустимое значение на 1 мкм. Но это значение может быть отнесено к грубым погрешностям либо являться случайной погрешностью оператора, а не тем значением, которое влияет на принятие решения по поверке. В этом случае годные приборы будут ошибочно приняты как дефектные.

3. При определении основной погрешности толщиномеров покрытий в процессе проведения поверки проводят прямые многократные измерения. Следовательно, должна учитываться случайная погрешность измерения (см. ГОСТ Р 8.736-2011 [69]), чего нет в первых двух методиках.

ГОСТ 8.502-84 [63] учитывает случайную составляющую, однако при обработке результатов измерений данная погрешность получается существенно завышенной (рисунок 2.5). Это приводит к тому, что годные толщиномеры покрытий в процессе поверки признаются дефектными.

Апробация методик поверки по ГОСТ 8.502-84 [63] и с учетом предложенных рекомендаций проводилась на толщиномере ТМ-20МГ4 при нулевой калибровке по прилагаемому к толщиномеру основанию на четырех мерах толщины.

Результаты измерений толщины покрытия и расчета погрешностей толщиномера приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты измерений толщины покрытия и расчета погрешностей толщиномера

Результаты измерений толщины меры, мкм					
Номинальное значение меры толщины	hн	49	101	260	520
Измеренные значения толщины меры	h1	62	106	250	497
	h2	61	107	255	499
	h3	64	105	253	497
	h4	61	105	254	499
	h5	61	107	255	500
Результаты расчета погрешностей по ГОСТ 8.502-84, мкм					
Систематическая погрешность (2.1)	$\tilde{\Delta}_c$	-12,8	-5	6,6	21,6
Случайная погрешность с учетом (2.2)	$\Delta^\circ$	3,624676537	2,78	5,764731	3,729761
Основная погрешность (2.3)	$\Delta$	-9,17532346	-2,22	12,36473	25,32976
Результаты расчета погрешностей по предложенным рекомендациям, мкм					
Систематическая погрешность (2.7)	$\tilde{\Delta}_c$	12,8	5	-6,6	-21,6
Случайная погрешность (2.8)	$\Delta^\circ$	1,621004627	1,243254	2,578066	1,668
Основная погрешность (2.9) $\Delta$	в «плюс»	14,42100463	6,243254	-4,02193	-19,932
	в «минус»	11,17899537	3,756746	-9,17807	-23,268
Допустимая погрешность +/-		4,47	6,03	10,8	18,6

Анализируя результаты, приведенные в таблице 2.4, можно заключить:

1. При измерении мер толщиной 49 мкм и 101 мкм измеренные значения толщины больше номинального значения данных мер, а при измерении двух других мер – меньше. Следовательно, систематическая погрешность в первых двух случаях должна быть положительной величиной, а в двух других – отрицательной. Это подтверждается в предложенных рекомендациях и не подтверждается в методике поверки по ГОСТ 8.502-84 [63].

2. Расчет случайной составляющей с учетом формулы (2.2) в методике по ГОСТ 8.502-84 [63] завышает ее величину в сравнении с формулой (2.8). Это приводит к тому, что годный толщиномер покрытия может быть отнесен к бракованному. Примером может служить оценка погрешности по мере с номинальной толщиной 260 мкм (таблица 2.4):

- допустимая погрешность – 10,8 мкм;
- основная погрешность по предложенным рекомендациям – 9,2 мкм (в пределах допустимой);

– основная погрешность по ГОСТ 8.502-84 [63] – 12,4 мкм (превышает допустимое значение).

3. Основная погрешность толщиномера покрытий, определенная по формуле  $\Delta = \tilde{\Delta}_c + \Delta^\circ$  (ГОСТ 8.502-84) [63], будет либо занижена, если систематическая составляющая имеет знак «минус» (меры 49 и 101 мкм в таблице 2.4), либо завышена, если систематическая составляющая имеет знак «плюс» (меры 260 и 520 мкм в таблице 2.4).

Еще одной особенностью при проведении поверки толщиномеров покрытий является то, что основная погрешность толщиномеров оценивается по эталонам (мерам) толщины, значение которых должно находиться в пределах диапазона измерений. В ГОСТ 8.502-84 [63] сказано, что поверка толщиномеров должна осуществляться по мерам, толщина которых близка к крайним значениям диапазона измерений в соответствии с эксплуатационной документацией. Стандарт дает общие рекомендации, но большинство методик на конкретные модели толщиномеров дублируют эти общие фразы из стандарта и не конкретизируют их значения (или интервал значений). Как будет показано ниже, поверенные и используемые в эксплуатации толщиномеры на заявленных в эксплуатационной документации граничных диапазонах измерений не отвечают требованиям по допустимой погрешности измерений.

Приведенные рекомендации по совершенствованию методики поверки магнитных толщиномеров можно рекомендовать для переработки ГОСТ 8.502-84 [63].

## **2.3 Выводы по второй главе**

1. Исследованы основные положения, используемые при создании Системы допусков на линейные размеры, Системы допусков формы и расположения поверхностей, нормирования шероховатости поверхностей. Проведен анализ основных принципов, на основе которых строятся системы допусков и посадок.

2. Разработана система допусков на толщину покрытий. Предложенная система не противоречит стандартам Единой системы защиты от коррозии и старения. 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.

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

4. Проведенный анализ нормативной документации на методики поверки толщиномеров покрытий показал, что:

– действующий ГОСТ 8.502-84 [63] имеет несоответствия в области определения основной погрешности и ее составляющих, что отражается на достоверности результатов поверки;

– структура определения погрешности в методиках поверки серийно выпускаемых толщиномеров не соответствует структуре ГОСТ 8.502-84 [63], т.к. не учитывает случайную составляющую основной погрешности. В результате поверки возможно ошибочное признание годным любого в действительности дефектного экземпляра толщиномера при оценке толщиномеров по среднему арифметическому их всех измерений, и наоборот – признание дефектными годных толщиномеров при оценке по наибольшему отклонению из всех измерений.

5. Предложены 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.

## ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ ПОКРЫТИЙ

### 3.1 Анализ погрешности выпускаемых магнитных толщиномеров покрытий

#### 3.1.1 Общие сведения о погрешности толщиномеров покрытий

Одним из основных требований, которые предъявляются к средствам измерений, является обеспечение достоверной оценки погрешности измерений. Отсутствие данных или недостоверная информация о погрешности измерений полностью или частично обесценивают результат измерения.

Некорректная оценка погрешности измерений приводит к экономическим потерям. Увеличение погрешности измерений приводит к увеличению дефектности продукции, а занижение погрешности измерений приводит к необходимости использования более точных и более дорогих средств измерений.

Ориентировочные расчеты, приведенные в [33] показывают, что снижение погрешности измерений толщины покрытий с 10 до 5 % позволит уменьшить количество неверно принятых в процессе контроля деталей с 5 до 2,6 %, а неверно забракованных деталей – с 7,8 до 3,4 %. Следовательно, появятся условия для снижения потерь за счет экономии материалов, энергии, рабочего времени, сопутствующих материалов и т.д.

Погрешность измерений толщины покрытий зависит от многих факторов:

- свойств применяемых толщиномеров покрытий;
- приемов и способов использования приборов (методик выполнения измерений);
- правильности методик калибровки и поверки толщиномеров;
- условий, в которых производятся измерения;
- скорости (частоты) изменения измеряемых величин;

– погрешности, вносимой оператором, и др.

Погрешность измерений, обусловленная свойствами применяемых средств измерений, называется инструментальной составляющей погрешности измерений, её можно разделить на четыре группы:

– основная погрешность толщиномеров покрытий, которая характеризуется отличием действительной функции преобразования толщиномера в нормальных условиях от номинальной функции преобразования;

– дополнительная погрешность толщиномеров покрытий, которая обусловлена реакцией средств измерений на изменения внешних влияющих величин и неинформативных параметров входного сигнала относительно их нормальных значений. В данном случае к внешним влияющим величинам можно отнести условия эксплуатации (температура, влажность, атмосферное давление, внешние электромагнитные помехи);

– динамическая погрешность, которая обусловлена реакцией толщиномеров на скорость (частоту) изменения входного сигнала. В магнитных толщиномерах динамическая составляющая учтена в конструкции приборов. Готовность прибора к снятию показаний может сопровождаться звуковым сигналом, включением дисплея и т.п.;

– погрешность, которая обусловлена взаимодействием средства измерений и объекта измерений. Для толщиномеров покрытий можно выделить параметры контролируемого объекта, ограничивающие область применения толщиномера: толщина и радиус кривизны контролируемой поверхности, краевой эффект, шероховатость поверхности и т.п.

### **3.1.2 Анализ погрешности и диапазона измерений магнитных толщиномеров**

Диапазон измерений и погрешность толщиномера покрытий являются основными метрологическими характеристиками и присутствуют в технической документации всех толщиномеров покрытий [67].



Учитывая, что в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений к применению допускаются средства измерений утвержденного типа и прошедшие поверку [62], для исследования были приняты толщиномеры покрытий, зарегистрированные в Государственном реестре с 2009 по 2020 гг. включительно.

Была исследована эксплуатационная документация 63 толщиномеров покрытий, выпускаемых различными предприятиями России, Белоруссии, Украины, Германии, США и Китая, и исследованы толщиномеры покрытий, в основу которых заложен магнитный метод неразрушающего контроля либо универсальные – основанные на магнитном и токовихревом методах. Основные их характеристики приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Основные метрологические характеристики толщиномеров покрытий

Модель толщиномера	Изготовитель, страна изготовителя	Диапазон измерения, мкм	Погрешность прибора, мкм
1	2	3	4
TOP-CHECK FE TOP-CHECK FE-B, MEGA-CHECK Pocket FE, MEGA-CHECK Basic, MEGA-CHECK Profi, MEGA-CHECK	Компания «List-Magnetik GmbH», Германия	0 – 5000	1 мкм (1 – 100) 1 % (100 – 1000) 3 % (1000 – 2000) 5% (свыше 2000)
Master с датчиками PF-5, PF-5S		0 – 5000	
Master с датчиками PFN-52D, PFN-52DS		0 – 5000	
Master с датчиками PF-1S, PF-1T		0 – 1000	
Master с датчиком PF-3T		0 – 3000	
Master с датчиком PF-30		0 – 30000	
Master с датчиком PF-6S		0 – 6000	
Master с датчиком PF-2T		0 – 2000	
МТНП-1	Институт прикладной физики НАН, Беларусь (Минск)	0 - 700	$\pm (1,5+0,03h)$

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
TM-2, TM-3, TM-4,  TM-4T	ООО «НВП «Кропус», Россия (Ногинск)	50 – 2000 1 – 100 1 – 2000 100 – 5000 2000 – 15000 2000 – 20000 5000 – 20000	$\pm 0,05 (100+h)$ $\pm (1+0,03h)$ $\pm 0,04 (100+h)$ $\pm 0,04 (100+h)$ $\pm 0,04 (100+h)$ $\pm 0,04 (100+h)$ $\pm 0,04 (100+h)$
TT210, TIME2510, TIME2500, TT260, TIME2600	Компания «Beijing TIME High Technology Ltd.», Китай	15 – 1250 15 – 1250 15 – 1250 15 – 400 15 – 1250 15 – 10000	$\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+1,5)$ $\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+10)$
МТНП-1М	ООО «НТЦ «Эталон», Россия (Санкт-Петербург)	50 – 1000	$\pm 0,10h$
NOVOTEST ТП Ф-0,3, Ф-0,5, Ф-2, Ф-5	ООО НТЦ «Промышленное оборудование и технологии», Россия (Санкт-Петербург)	1 – 300 1 – 500 1 – 2000 1 – 5000	$\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+1)$ $\pm (0,03h+2)$ $\pm (0,03h+2)$
VA-TM8042	Компания «Shanghai Yihua V&A Instrument Co., Ltd.», Китай	1 – 1200	$\pm (0,03h+2)$
МТДП-1	ИПФ НАН Беларуси, Беларусь (Минск)	0 - 150 0 - 700	$\pm (0,05h+5)$ $\pm (0,1h+5)$
FMP10, FMP20, FMP30, FMP40 FMP100, MP150	Компания «Helmut Fischer GmbH», Германия	0 - 2000	$\pm 1 \text{ мкм} (0 - 100)$ $\pm 1\% (100 - 1000)$ $\pm 3\% (1000 - 2000)$
MPOR, MPOR-FP,		0 - 2500	$\pm 1,5 \text{ мкм} (0 - 100)$ $\pm 1,5\% (100 - 1000)$ $\pm 3\% (1000 - 2500)$
MPORH-FP		0 – 7000	$\pm 5 \text{ мкм} (0 - 150)$ $\pm 3\% (150 - 3000)$ $\pm 5\% (3000 - 6000)$
PosiTector 6000 и PosiTest DFT с 24 датчиками	Компания «DeFelsko Corporation», США	10 - 1150 10 - 625 10 - 1500 20 - 6000 50 - 13000 400 - 38000	$\pm (0,03 h + 2)$ $\pm (0,03 h + 1)$ $\pm (0,03 h + 1)$ $\pm (0,03 h + 10)$ $\pm (0,03 h + 20)$ $\pm (0,03 h + 200)$
SaluTron D1, SaluTron D2X,  SaluTron D4, SaluTron ComBi D3	Компания «SaluTron Messtechnik GmbH», Германия	0 - 1950 0 - 1950  0 - 4800 0 - 3300	$\pm (1,5+0,02h) (0 - 100)$ $\pm (2+0,02h) (100 - 1000)$ $\pm (10+0,02h) (1000 - 1950)$ $\pm (1,5+0,03h) (0 - 100)$ $\pm (2+0,03h) (100 - 1000)$ $3\pm (10+0,02h) (\text{более } 1000)$

Продолжение таблицы 3.1

1	2	3	4
КОНСТАНТА МК4 с преобразователями ИД1 ИД2  ИД3  ИД4 ИД5 ПД1  ПД2  ПД3  ИПД	ООО «КОНСТАНТА», Россия (Санкт-Петербург)	0 – 300 0 – 2000  0 – 5000  0 – 8000 0 – 10000 0 – 2000  0 – 15000  0 – 30000  0 – 1000	$\pm(0,02h+2)$ $\pm(0,02h+2)$ (0 – 1000) $\pm 0,02h$ (1000 – 2000) $\pm(0,02h+5)$ (0 – 1000) $\pm 0,02h$ (1000 – 5000) $\pm(0,02h+10)$ $\pm(0,02h+10)$ $\pm(0,02h+2)$ (0 – 1000) $\pm 0,02h$ (1000 – 2000) $\pm(0,02h+10)$ (0 – 10000) $\pm 0,03h$ (10000 – 15000) $\pm(0,02h+10)$ (0 – 10000) $\pm 0,03h$ (10000 – 30000) $\pm(0,02h+2)$
ТМ-20МГ4 ТМ-50МГ4 ТМИ-200МГ4	ООО «КТБ Стройприбор», Россия (Челябинск)	0 – 2000 0 – 5000 1 – 20000	$\pm (3+0,03h)$ $\pm (3+0,03h)$ $\pm (100+0,03h)$
NOVOTEST ТП-1	ООО НТЦ «Промтехнологии», Украина	0 - 5000	$\pm (1+0,03h)$ (0 - 500) $\pm (2+0,03h)$ (500 - 5000)
МТ2-01 МТ20-01 АКАSCAN10.08 АКАSCAN20.07 АКАSCAN30.07	ООО «АКА-Скан», Россия (Москва)	5-2000  100 – 15000 100 – 20000 100 – 20000	$\pm (1,5+0,03h)$
МТ-1008 МТ-2007 МТ-2007М		5 – 2000 50 – 20000	

Сравнение установленной нормативными документами толщины различных видов покрытий с диапазоном измерений различных толщиномеров покрытий представлено на рисунке 3.1. При построении диаграммы в средней части нанесена шкала измерения толщины покрытий от 0 до 10 мм. Над шкалой расположены интервалы толщины по видам покрытий или объектов, которые были приведены выше. Под шкалой расположены диапазоны измерения толщины покрытий магнитными и токовихревыми толщиномерами.

Анализ показал, что большинство видов покрытий и изделий имеют толщину покрытий до 300 мкм. Гораздо меньше примеров можно привести, когда толщина покрытий составляет миллиметры.

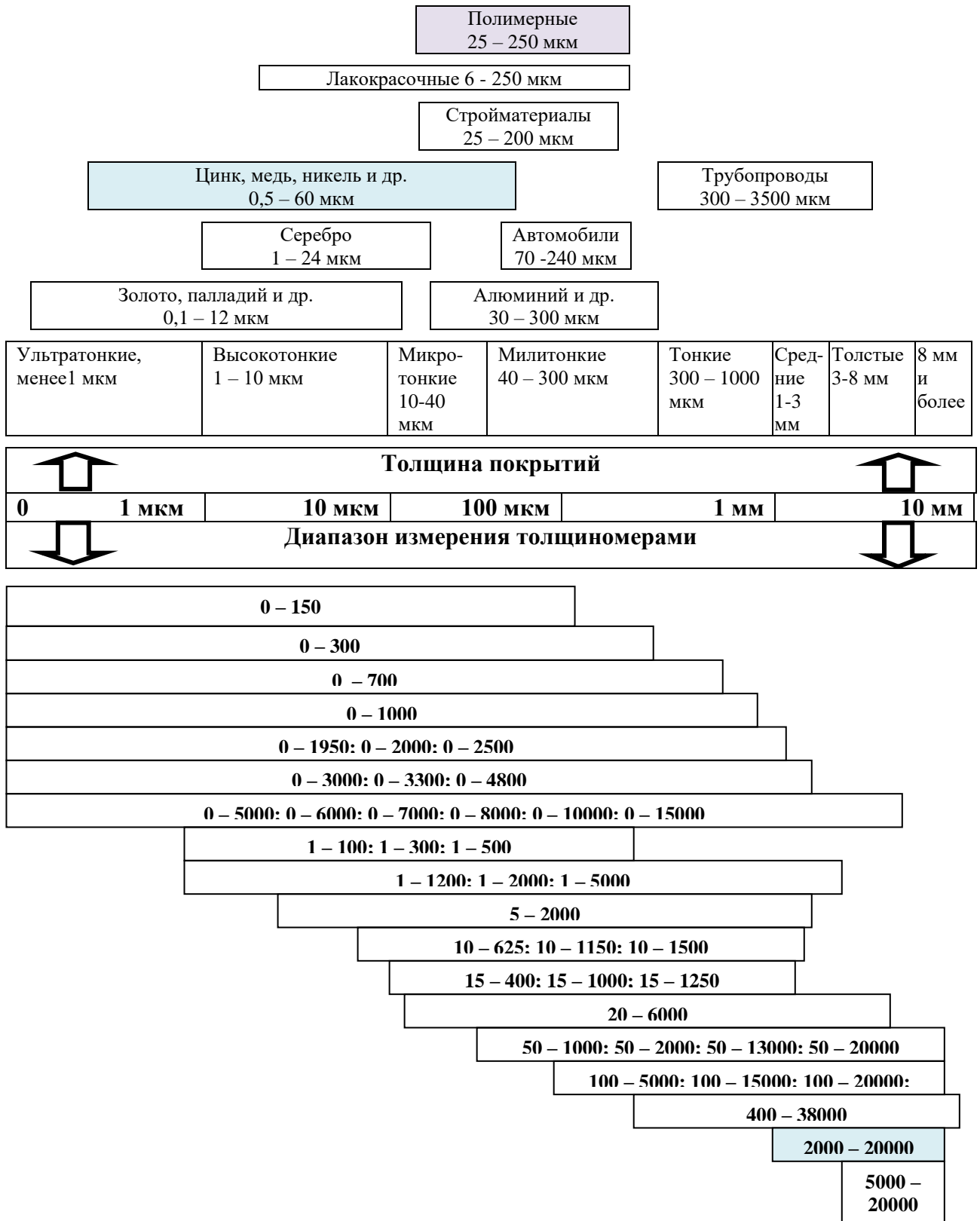


Рисунок 3.1 – Сравнение толщины покрытий и диапазонов измерений толщиномеров покрытий

Диапазон измерений у большинства толщиномеров покрытий имеет свое индивидуальное значение.

Анализ показал, что 63 исследуемых толщиномеров имеют 43 разных диапазона измерения толщины покрытия. Ни одно средство измерений линейных и диаметральных размеров не имеет такого неоправданно большого и необъяснимого количества диапазонов измерений. Например, штангенциркули по ГОСТ 166-89 [105] в пределах от 0 до 2000 мм имеют 15 диапазонов, индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм по ГОСТ 577-68 [106] в пределах от 0 до 25 мм имеют 4 диапазона, микрометры гладкие по ГОСТ 6507-90 [107] в пределах от 0 до 600 мм имеют 15 диапазонов и т.п.

Фиксированное и минимально необходимое количество диапазонов измерений можно обеспечить только за счет стандартизации средств измерений, что отсутствует у толщиномеров покрытий.

Кроме того, сложно объяснить, зачем выпускается ряд толщиномеров, имеющих нарастающий диапазон измерений. Например, немецкая компания «List-Magnetik GmbH» выпускает толщиномеры с диапазонами измерений, мкм: 0 – 2000, 0 – 3000, 0 – 5000, 0 – 6000, которые имеют одинаковую погрешность 5 % от толщины покрытия. Очевидно, что первые три толщиномера может заменить один последний. Такие же примеры можно привести и для российских, китайских и др. толщиномеров.

И наконец, большинство покрытий наносятся толщиной до 1000 мкм (рисунок 3.1), а толщиномеры с диапазоном до 1000 мкм выпускаются в ограниченном количестве (таблица 3.1). Поэтому при разработке новых толщиномеров покрытий упор необходимо делать не на увеличение диапазона измерений, а на снижение погрешности толщиномеров.

Рассмотрим, как нормируется погрешность у серийно выпускаемых толщиномеров. Анализ толщиномеров, приведенных в таблице 3.1, позволяет отметить три способа задания погрешности толщиномеров:

– первый способ самый простой, при нем задается линейная зависимость погрешности в зависимости от толщины покрытия во всем диапазоне измерения. Например,  $\pm (1,5+0,03h)$  для толщиномеров моделей МТ2-01, МТ1008, МТ-2007

(Россия), или  $\pm (2+0,03h)$  для толщиномеров VA-TM8042 (Китай), или  $\pm (10+0,03h)$  для толщиномеров PosiTector 6000 (США). Графическое представление погрешности приведено на рисунке 3.2;

– второй способ заключается в разбивке погрешности в пределах диапазона измерений на поддиапазоны. Так, толщиномеры моделей SaluTron D1 и SaluTron D2X (Германия) в диапазоне от 0 до 1950 мкм имеют следующую погрешность:  $\pm (1,5+0,02h)$  в поддиапазоне 0-100 мкм;  $\pm (2+0,02h)$  в поддиапазоне 100-1000 мкм;  $\pm (10+0,02h)$  в поддиапазоне 1000-1950 мкм. На два поддиапазона разбита погрешность у толщиномеров NOVOTEST ТП-1 (Украина) и КОНСТАНТА МК4 (Россия). Графическое представление погрешности показано на рисунке 3.3;

– третий способ распространен в Германии: при таком способе нормирования погрешности толщиномера диапазон измерений также разбивается на поддиапазоны. Отличие заключается в том, что в первом поддиапазоне устанавливается фиксированное значение погрешности, а в следующих поддиапазонах погрешность толщиномера задается в процентах от толщины покрытия. Например, для толщиномеров моделей TOP-CHECK FE, TOP-CHECK FE-B, MEGA-CHECK Pocket FE, MEGA-CHECK Basic и других (Германия) погрешность толщиномеров нормирована следующим образом: 1 мкм в поддиапазоне 1 – 100 мкм; 1 % в поддиапазоне 100 – 1000 мкм; 3 % в поддиапазоне 1000 – 2000 мкм; 5% в поддиапазоне свыше 2000 мкм. На рисунке 3.4 приведены графические зависимости для третьей группы толщиномеров.

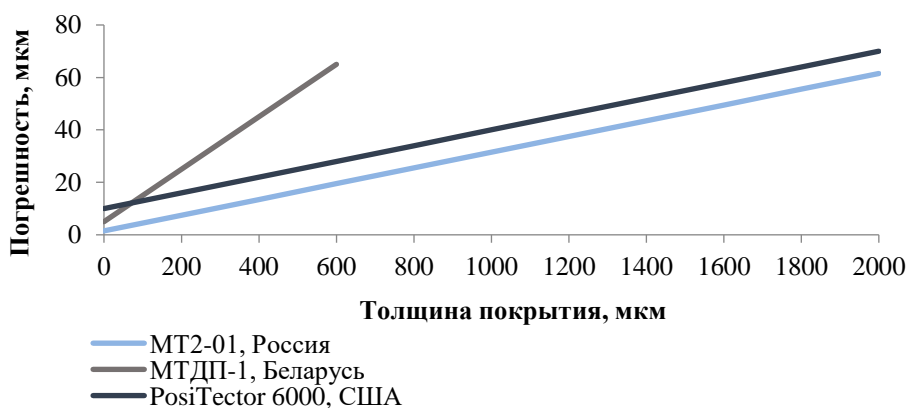


Рисунок 3.2 – Линейная зависимость погрешности толщиномера в зависимости от толщины покрытия во всем диапазоне измерения

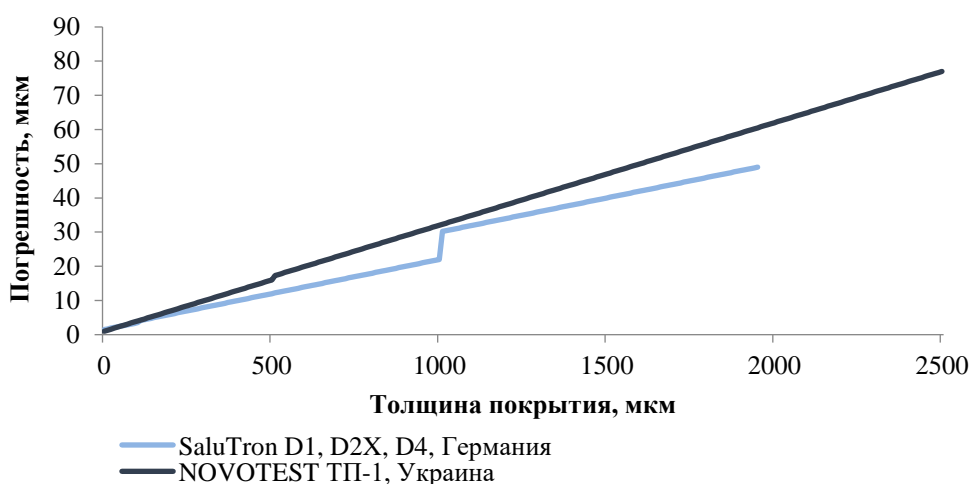


Рисунок 3.3 – Разбивка погрешности в пределах диапазона измерений на поддиапазоны

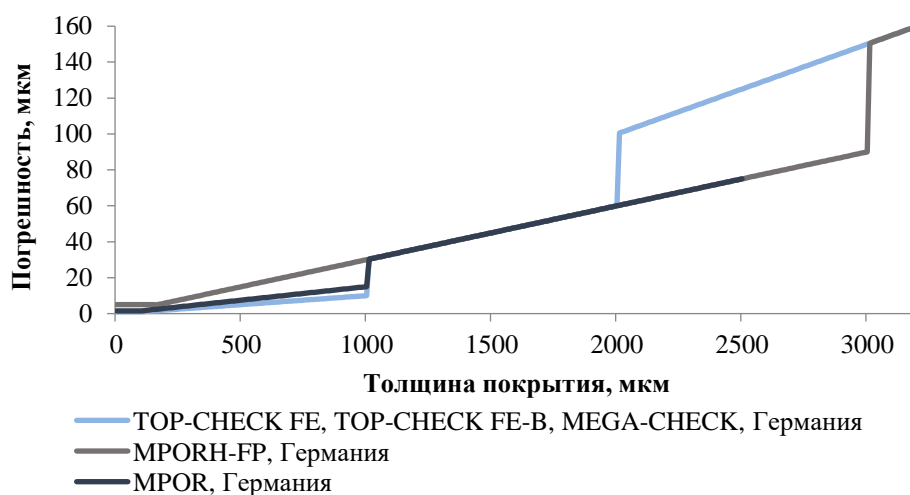


Рисунок 3.4 – Разбивка погрешности в пределах диапазона измерений на поддиапазоны с фиксированным значением в первом поддиапазоне

При данном способе нормирования погрешности толщиномеров переход из первого диапазона во второй происходит плавно. При переходе из второго диапазона в третий происходит увеличение погрешности в три раза, а из третьего поддиапазона в четвертый – в 1,7 раза. При проведении оценки погрешности на границах поддиапазонов возникает следующая ситуация: при толщине покрытия 999 мкм погрешность толщиномера составляет 9,99 мкм, а при толщине 1001 мкм – 30,03 мкм.

Анализ способов нормирования погрешности толщиномеров показывает, что преимущество остается за первым способом, который заключается в установлении

одной зависимости погрешности толщиномеров во всем диапазоне.

Кроме того, по результатам анализа толщиномеров, приведенных в таблице 3.1, установлено, что у 30 толщиномеров из 63 приведенных интервал измерения начинается с нуля. На основе данной информации потребители вправе считать, что толщиномерами данной группы они смогут контролировать покрытия из драгоценных металлов, толщина которых начинается от 0,1 мкм, или покрытия из цинка, меди, никеля и др., толщина которых начинается от 0,5 мкм. Но это не соответствует действительности. Даже толщиномеры, имеющие разрешение 0,1 мкм (например, толщиномеры немецкой компании «List-Magnetik GmbH») при измерении толщины покрытия 0,1 мкм будут иметь погрешность 1 мкм, что в 10 раз больше, чем измеряемая толщина покрытия. Толщиномеры ТМ-20МГ4 измерить толщину покрытия меньше 1 мкм вообще не могут, т.к. разрешение прибора составляет 1 мкм. И при измерении минимально возможного размера толщины покрытия (1 мкм) погрешность прибора в три раза превысит измеряемую величину. Следовательно, информация, приведенная в нормативной документации на эти толщиномеры, не достоверна, что противоречит требованиям ФЗ «О защите прав потребителей» [61], в котором сказано, что «изготовитель (исполнитель, продавец) обязан своевременно предоставлять потребителю необходимую и достоверную информацию о товарах (работах, услугах), обеспечивающую возможность их правильного выбора».

Для нормирования погрешности толщиномеров воспользуемся рекомендациями ГОСТ 8.051-81 [108], который устанавливает погрешность измерения для деталей гладких цилиндрических соединений.

Погрешность толщиномеров определяем по формуле:

$$\Delta = K * T,$$

где  $K$  – коэффициент, равный 0,20 ... 0,35;

$T$  – допуски на толщину покрытия, которые приведены в таблице 2.3.

Принимаем коэффициент  $K=0,35$  для первой и второй степеней точности,  $K=0,30$  для третьей,  $K=0,25$  для четвертой и  $K=0,20$  для пятой степеней точности.



Расчетные значения погрешностей приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – 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 коэффициента погрешности $K$	0,35	0,35	0,30	0,25	0,20

Выбор толщиномера по точности заключается в том, чтобы наибольшая погрешность, являющаяся нормированным метрологическим показателем толщиномера, не превышала погрешности, приведенной в таблице 3.2 для соответствующего интервала толщины покрытия.

Информация, приведенная в таблице 3.2, позволит определить наименьшее значение диапазона измерения толщиномером. Например, толщиномерами, у которых погрешность составляет  $\pm (0,01h+1)$  или  $\pm (0,03h+1)$ , можно измерять толщину покрытия начиная с 12 – 15 мкм, а не с нуля, как указано в их технической документации. Если толщиномеры имеют погрешность  $\pm (0,03h+3)$ , то ими можно пользоваться, начиная с 40 мкм и больше.

Анализ погрешности и диапазона измерений магнитных толщиномеров выявил следующее:

1. Рынок России насыщен большим количеством магнитных толщиномеров, выпускаемых как в нашей стране, так и за рубежом. 43 из 63 исследуемых толщиномеров имеют разные неповторяемые диапазоны измерений, что не позволяет выстроить линейку (ряд) стандартных диапазонов, позволяющих унифицировать выпуск приборов.

2. В технической документации 30 толщиномеров из 63 исследуемых указан интервал измерения, который начинается с нуля, что не может обеспечить ни один толщиномер. Это является недостоверной информацией для потребителей таких толщиномеров, а значит изготовителям толщиномеров необходимо более ответственно подходить к назначению метрологических характеристик.

3. Для выбора толщиномеров по точности предложен ряд погрешностей, значения которых зависят от номинального размера толщины покрытия, допуска на толщину покрытия и степени точности.

### **3.2 Экспериментальная проверка погрешности толщиномеров в нормированном диапазоне измерений**

#### **3.2.1 Разработка методики проведения экспериментальных исследований**

В результате экспериментальных исследований необходимо оценить погрешность толщиномеров при измерении толщины покрытий магнитными толщиномерами. В основу методики проведения экспериментальных исследований принимаем рекомендации, приведенные в ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений [110].

Методика экспериментальных исследований строится на основе исходных данных, которые включают объект исследования, наименования исследуемых величин, требования к показателям точности, требования к условиям выполнения

измерений, требования к вспомогательным средствам измерений и мерам толщины.

**Объектом исследования** являются магнитные толщиномеры ТМ-20МГ4 (рисунок 1.11, б), ТТ210 (рисунок 1.8, а) и ТТ220 (рисунок 1.11, а). Основные их метрологические и технические характеристики приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Основные характеристики толщиномеров

Метрологические характеристики / Модель	ТМ-20МГ4	ТТ210	ТТ220
Диапазон измерения, мкм	0 – 2000	0 – 1250	0 – 1250
Погрешность измерения, мкм	$\pm (0,03h+3)$	$\pm (0,03h+1)$	$\pm (0,03h+1)$
Разрешение, мкм	1,0	0,1	1,0
Минимальный радиус кривизны, мм	40	1,5	1,5
Минимальный диаметр области измерения, мм	–	7	7
Критическая толщина основания, мм	0,4	0,5	0,5
Расстояние от центра преобразователя до края основания, мм	24,5	–	–

**К исследуемым величинам** относится погрешность толщиномеров, которая может возникать в процессе их эксплуатации. Особенностью измерений магнитными толщиномерами является то, что перед началом процесса измерения требуется калибровка прибора. Кроме того, конструкцией прибора могут быть предусмотрены различные виды калибровки:

– нулевая калибровка, которая заключается в установке нулевого значения толщиномера по прилагаемому основанию;

– настройка диапазона измерений, при которой сначала проводится нулевая калибровка, а затем толщиномер настраивается по мере толщины, входящей в комплект толщиномера исходя из предполагаемого диапазона измерений;

– настройка диапазона измерений по двум мерам толщины.

**Требования к показателям точности.** Точность проведения экспериментальных исследований определяется рядом факторов. Одним из основных является методика определения погрешности измерений, которая заключается в следующем:

1. Для определения основной погрешности толщиномера на каждой мере

проводят по пять наблюдений, результаты которых заносят в таблицу протокола измерений. При данном методе измерений вариация показаний отсутствует, поэтому систематическую составляющую погрешности толщиномера определяют по формуле:

$$\Delta_c = \tilde{h}_c - h_n, \quad (3.1)$$

где  $h_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i$ .

2. При определении случайной погрешности необходимо использовать среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценку измеряемой величины)  $\sigma_x$ .

Тогда случайная погрешность равна

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \sigma_x, \quad (3.2)$$

где  $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_c)^2}{n(n-1)}}$ .

3. Основную погрешность толщиномера покрытий необходимо определять по следующей формуле:

$$\Delta = \tilde{\Delta}_c \pm \overset{\circ}{\Delta} \quad (3.3)$$

При доверительной вероятности  $P=0,95$  и числе наблюдений (измерений)  $n=5$  коэффициент Стьюдента  $t=2,78$ .

Остальные факторы, влияющие на точность исследования, приведены ниже.

**Требования к условиям выполнения измерений.** Условия измерений:

- температура окружающего воздуха  $(20 \pm 4)$  °С;
- относительная влажность воздуха от 30 % до 80 %;
- атмосферное давление от 84 кПа до 106 кПа (от 630 до 800 мм.рт.ст.);
- отсутствие сильных магнитных полей – прибор должен находиться не менее чем в 30 см от источников электромагнитного излучения (монитора, вентилятора, зарядного устройства и т.п.).

**Требования к вспомогательным средствам измерений и мерам толщины.** Исследование точностных характеристик толщиномеров проводится с помощью мер толщины, моделирующих покрытие заданной толщины, и образцов деталей, выполняющих роль оснований. Следовательно, на точность выполнения исследований будут влиять точность оценки толщины мер покрытий и точность измерения размеров и шероховатости образцов деталей.

Значения толщины мер покрытий измеряли измерительной головкой Extramess 2000 производства компании «Mahr GmbH», Германия (рисунок 3.5) абсолютным методом. Головка устанавливалась в индикаторную стойку с гранитным основанием. Основные технические и метрологические характеристики измерительной головки:

- диапазон измерения – 0,8 мм; 1,8 мм;
- разрешение – 0,001 мм;
- погрешность –  $\pm(0,3..0,6)$  мкм;
- измерительное усилие – от 0,7 до 0,9 Н.

Размеры образцов деталей измеряли электронным штангенциркулем серии 605А производства КНР (рисунок 3.6), диапазон измерения которого составляет 200 мм, дискретность отчета 0,01 мм, погрешность 0,03 мм.



Рисунок 3.5 – Головка измерительная



Рисунок 3.6 – Штангенциркуль с цифровым отсчетным устройством

Шероховатость измеряли прибором Surftest SJ-210 производства компании Mitutoyo, Япония (рисунок 3.7), это компактный и универсальный прибор для измерения параметров шероховатости: Ra, Rq, Rz и др. Основные технические

характеристики прибора:

- диапазон измерения 360/0,02; 100/0,006; 25/0,002 мкм;
- разрешение 0,02; 0,006; 0,002 мкм;
- длина отсечки 0,08-0,25-0,8-2,5 мм.



Рисунок 3.7 - Измеритель шероховатости Surfrest SJ-210

В результате для проведения экспериментальных исследований были подготовлены меры толщины, номинальные размеры которых приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 - Значение толщины мер покрытий

№ меры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина, мкм	8	23	35	49	101	196	260	325	520	988	1552	1863

**Подготовка к выполнению измерений.** Перед проведением измерений меры толщины покрытий и рабочую поверхность основания обработать техническим спиртом по ГОСТ Р 55878-2013 [109]. Провести нулевую калибровку толщиномера по прилагаемому к комплекту основанию.

**Порядок выполнения измерений.** Установить меру толщины по середине основания. Установить толщиномер перпендикулярно измеряемой поверхности и произвести измерение толщины установленной меры. Убрать толщиномер, снять показания прибора, результат измерения записать. Повторить измерения еще четыре раза. Измерить все меры толщины, указанные в таблице 3.4. Перед

установкой очередной меры толщины провести нулевую калибровку толщиномера.

**Обработка результатов измерений.** Обработку результатов измерений произвести в следующей последовательности:

- по формуле (3.1) рассчитать систематическую составляющую погрешности толщиномера;
- по формуле (3.2) рассчитать случайную составляющую погрешности толщиномера;
- определить суммарную погрешность толщиномера по формуле (3.3).

### 3.2.2 Методика проверки гипотезы о нормальности распределения результатов измерений магнитными толщиномерами

Условие нормальности в отношении дисперсионного анализа предполагает, что значения зависимой переменной имеют нормальное распределение в пределах каждой экспериментальной группы. В ряде случаев расчеты допускаются только в том случае, если заранее известно, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению.

Проверку нормальности можно выполнять как визуально, оценив характер распределения значений анализируемой переменной, так и при помощи формальных критериев. Визуальная оценка может применяться только при большом количестве наблюдений.

При числе наблюдений (результатов измерений)  $n \leq 50$  нормальность их распределения проверяют с помощью составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011 [69].

Сначала ведется проверка по **критерию 1**. Для этого вычисляют отношение

$\tilde{d}$ :

$$\tilde{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^{*}}, \quad (3.4)$$

где  $S^*$  - смещенное среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (3.5)$$

Результаты измерений в ряду считают распределенными нормально, если

$$d_{1-q/2} < \tilde{d} \leq d_{q/2}, \quad (3.6)$$

где  $d_{1-q/2}$  и  $d_{q/2}$  - квантили распределения, значения которых приведены в ГОСТ Р 8.736-2011 [69].

Принимая уровень значимости  $q_1 = 1\%$  и  $99\%$  для двадцати пяти измерений, получим квантили распределения  $d_{q/2} = 0,8841$  и  $d_{1-q/2} = 0,7096$ .

Для проверки по критерию 2 считают, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению, если не более  $m$  разностей  $(x_i - \bar{x})$  превысили значение  $z_{P/2} \cdot S$ , где  $S$  - среднее квадратическое отклонение, вычисляемое по формуле  $S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ ;  $z_{P/2}$  - верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа, отвечающий вероятности  $P/2$ .

Значения вероятности  $P$  определяют по таблице ГОСТ Р 8.736-2011 по выбранному уровню значимости  $q_2$ , %, и числу результатов измерений  $n$ . Для уровня значимости  $q_2 = 1\%$  и  $n = 25$  значение вероятности  $P = 0,98$  и  $m = 2$ .

Верхний квантиль распределения нормированной функции Лапласа для  $P = 0,98$  равен  $z_{P/2} = 2,33$ .

При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

### 3.2.3 Методика однофакторного дисперсионного анализа

При оценке погрешности толщиномеров покрытий проводится пассивный однофакторный эксперимент, не требующий его планирования. В качестве фактора принята толщина мер, моделирующих толщину измеряемого покрытия. В качестве



выходного параметра (целевой функции) принимаем погрешность толщиномера.

При планировании эксперимента выбирается область определения факторов, выбирается нулевой (основной) уровень и интервал варьирования фактора. Нулевой уровень выбирается как можно ближе к области оптимизации, которая нам не известна. Интервал варьирования фактором не можем обеспечить одинаковым для всех уровней фактора, т.к. действительные значения мер толщины покрытия аттестованы индивидуально и их размеры не могут чередоваться с определенным шагом, поэтому останавливаемся на пассивном однофакторном эксперименте.

Однофакторный дисперсионный анализ проводится для выявления влияния фактора на изменение данных с вероятностью  $P = 1 - \alpha$ .

Для проведения однофакторного дисперсионного анализа данных статистического комплекса, необходимо найти фактическое отношение Фишера - отношение дисперсии, объяснённой влиянием фактора (межгрупповой), и необъяснённой дисперсии (внутригрупповой):

$$F = \frac{MS_a}{MS_e} \quad (3.7)$$

и сравнить его с критическим значением Фишера  $F_{\alpha, \nu_a, \nu_e}$ .

Если фактическое значение отношения Фишера больше критического ( $F > F_{\alpha, \nu_a, \nu_e}$ ), то фактор существенно влияет на изменение данных и данные зависимы от фактора с вероятностью  $P = 1 - \alpha$ . Если фактическое значение отношения Фишера меньше критического ( $F < F_{\alpha, \nu_a, \nu_e}$ ), то фактор не оказывает существенного влияния на данные с вероятностью  $P = 1 - \alpha$  ( $\alpha$  – уровень значимости).

Однофакторный дисперсионный анализ основан на том, что сумму квадратов отклонений статистического комплекса возможно разделить на компоненты:

$$SS = SSa + SSe, \quad (3.8)$$

где  $SS$  - общая сумма квадратов отклонений;

$SSa$  - объяснённая влиянием фактора  $a$  сумма квадратов отклонений;

$SS_e$  - необъяснённая сумма квадратов отклонений или сумма квадратов отклонений ошибки.

Введем следующие обозначения:

$a$  – общее число градаций фактора (групп);

$n_i$  – число вариантов в каждом классе градации (группе);

$n = \sum_{i=1}^a n_i$  – общее число наблюдений;

$v_a = a - 1$  - число степеней свободы объяснённой дисперсии;

$v_e = n - a$  - число степеней свободы необъяснённой дисперсии;

$v = n - 1$  - общее число степеней свободы.

Вычисляем суммы квадратов отклонений:

– общее число квадратов отклонений:

$$SS = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X})^2; \quad (3.9)$$

– объяснённая влиянием фактора  $a$  сумма квадратов отклонений:

$$SS_a = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2;$$

– необъяснённая сумма квадратов отклонений или сумма квадратов отклонений ошибки:

$$\begin{aligned} SS_e &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2 = \\ &= (n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2 + \dots + (n_a - 1) s_a^2, \end{aligned}$$

где

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} X_{ij} \quad - \text{общее среднее наблюдений};$$

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} X_j \quad - \text{среднее наблюдений в каждой градации фактора (группе);}$$

$s_i^2$  – дисперсия градации фактора (группы).

Дисперсии рассчитываются следующим образом:

$$MS_a = \frac{SS_a}{a - 1} \quad - \text{объяснённая дисперсия};$$

$$MS_e = \frac{SS_e}{n - \alpha} - \text{необъяснённая дисперсия.}$$

После этого можно рассчитать фактическое отношение Фишера и сделать заключение о влиянии фактора на изменение данных.

### **3.2.4 Влияние количества измерений при экспериментальной оценке погрешности толщиномеров**

При экспериментальной проверке погрешности толщиномеров проводятся многократные измерения. Например, в руководстве по эксплуатации толщиномеров покрытий ТТ210 и ТТ220 сказано, что измерения необходимо провести «несколько» раз, а сколько именно не указано. В методике поверки этих приборов сказано, что при определении погрешности прибора проводят измерения толщины покрытия не менее трех раз.

В руководстве по эксплуатации толщиномеров покрытий ТМ-20МГ4 рекомендации по количеству измерений отсутствуют, а при поверке прибора измерения проводятся пять раз.

Для проверки влияния количества измерений на величину погрешности проведем экспериментальную проверку на двух толщиномерах покрытий. Для этого проводим измерения толщины трех мер с номинальными размерами 49, 260 и 520 мкм. Меры толщины устанавливались на прилагаемые к приборам основания. По этим же основаниям перед измерениями проводилась нулевая калибровка приборов. Каждым прибором проведены измерения 3, 5, 10, 15, 20, 30 раз на каждой мере.

Сначала проведена оценка влияния количества измерений на отдельные составляющие погрешности (систематическую и случайную) и полную (суммарную) погрешность.

Результаты исследования полной погрешности представлены на рисунке 3.8, а) для толщиномера ТТ220 и на рисунке 3.8, б) для толщиномера ТМ-20МГ4.

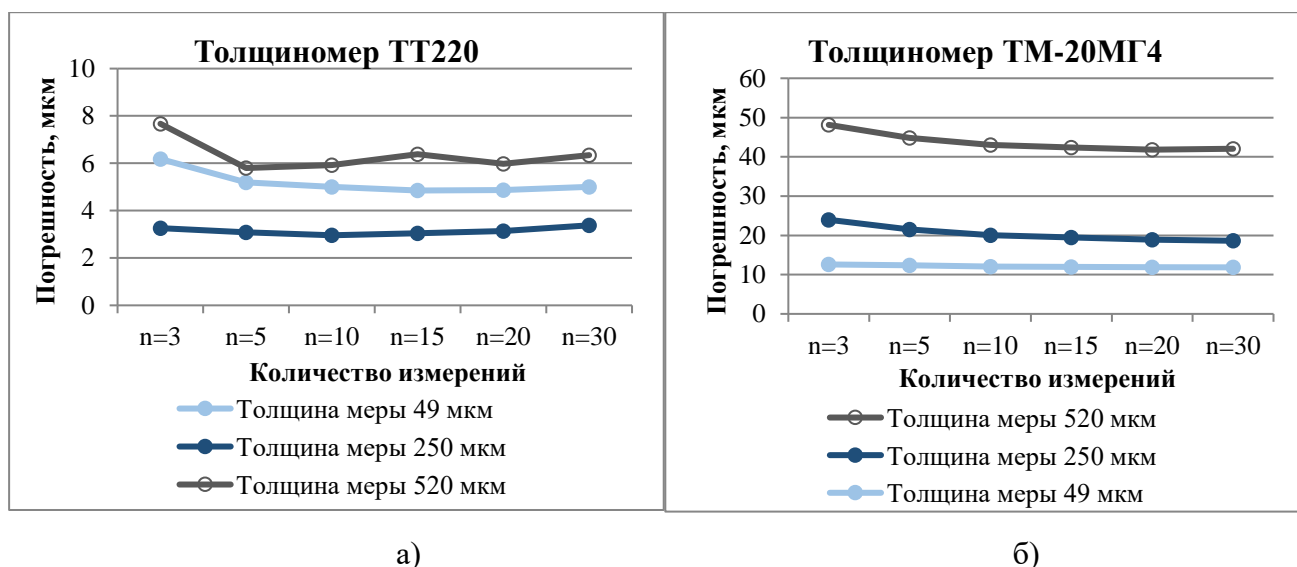


Рисунок 3.8 – Влияние количества измерений на суммарную погрешность измерений

По результатам исследований можно заключить, что начиная с пяти измерений полная погрешность толщиномеров покрытий стабилизируется. Колебания погрешности при количестве измерений от пяти до 30 лежит в пределах погрешности эксперимента (порядка одного мкм и менее). При трех измерениях полная погрешность может возрасти до 25 %. Вероятность увеличения погрешности при трех измерениях составляет порядка 80 %.

Следовательно, оптимальным количеством измерений при нахождении действительного значения толщины покрытий или оценки погрешности толщиномеров является пять измерений. Большее количество измерений нецелесообразно, т.к. связано с увеличением затрат на процесс измерения.

### 3.2.5 Проверка адекватности мер толщины, используемых при экспериментальном исследовании

При экспериментальном исследовании использовали меры толщины, взятые из комплектов разных толщиномеров. Чтобы исключить влияние материала мер толщины, технологии их изготовления и др. на достоверность результатов проведенных экспериментов, было проведено исследование по оценке погрешности измерения с разными мерами толщины.

Меры толщины группировали по номинальным размерам, близким для двух мер от разных толщиномеров. Для этого использовались меры толщиной, мкм: 49 и 48,6; 101 и 98,8; 260 и 250; 497 и 520; 988 и 992. Измеряли погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 на одном основании при одних и тех же условиях. Результаты исследования, приведенные как в абсолютном выражении погрешности толщиномера (рисунок 3.9, а), так и в относительном (рисунок 3.9, б), показали, что при приближении номинальных размеров толщины мер погрешность толщиномеров отличается незначительно и находится в рамках погрешности эксперимента. При определении относительной погрешности основную погрешность, полученную в результате измерения, относили к номинальному значению толщины меры.

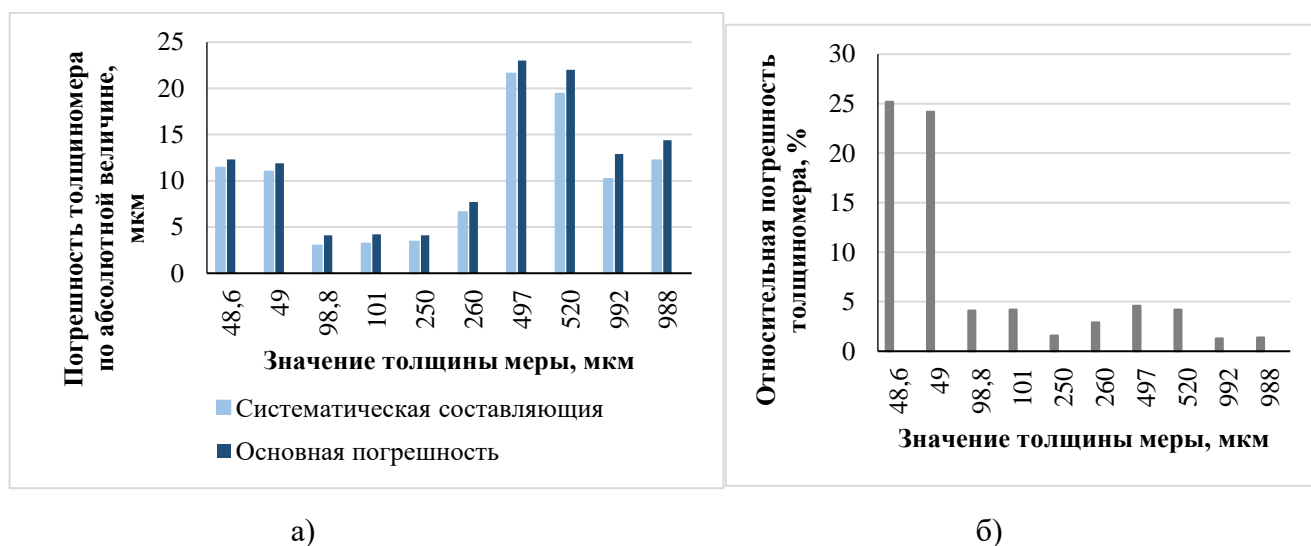


Рисунок 3.9 – Проверка адекватности мер толщины, входящих в комплекты различных толщиномеров

По результатам исследований можно заключить, что на погрешность эксперимента модель толщиномера, в комплект которого входили меры толщины, не влияет, а значит для дальнейших исследований комплектуем один набор мер толщины покрытий.

### 3.2.6 Экспериментальная оценка погрешности толщиномера ТМ-20МГ4 по прилагаемому в комплекте прибора основанию

Толщиномер ТМ-20МГ4 используется для измерения немагнитных покрытий толщиной от 0 до 2000 мкм, нанесенных на магнитное основание. Нормируемая погрешность измерения составляет  $\pm (0,03h + 0,003)$  мм, где  $h$  – толщина измеряемого покрытия.

На рисунке 3.10 приведено изменение относительной нормируемой погрешности толщиномера (%) в зависимости от толщины измеряемого покрытия.

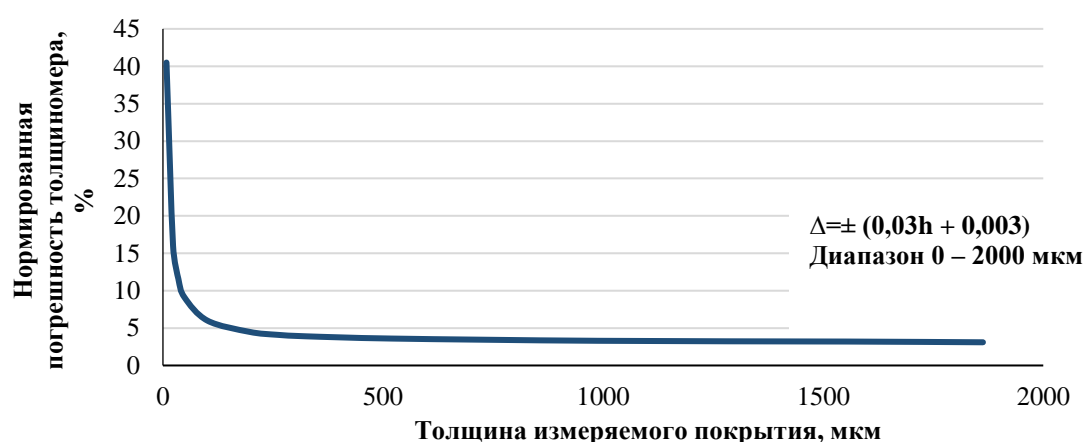


Рисунок 3.10 – Зависимость нормируемой погрешности толщиномера ТМ-20МГ4 от толщины измеряемого покрытия

Расчеты показывают, что при измерении малой толщины покрытия отмечается большая погрешность толщиномера. Так, при измерении покрытия толщиной 5 мкм погрешность составляет 63 % от номинального значения толщины, а при измерении толщины покрытия толщиной 10 мкм – 33 %. Следует отметить, что проценты от всей толщины, а не от допуска, как нормируются средства измерения других геометрических параметров (штангенинструменты, микроинструменты и т.п.). Анализируя нормируемую погрешность измерения, можно заключить, что данный толщиномер можно применять для измерения толщины покрытия в диапазоне от 100 до 2000 мкм. Относительная погрешность будет находиться от 6 до 3 процентов.

При экспериментальных исследованиях погрешность толщиномеров оценивалась для идеальных условий измерений: нулевая калибровка и измерения проводились на основаниях, прилагаемых к толщинумеру. В этом случае магнитные свойства материала, толщина и другие размеры основания, изогнутость основания, кромочный эффект, шероховатость поверхности основания не влияют на погрешность толщиномера.

Экспериментальные исследования проведены на мерах, толщина которых составляла, мкм: 8, 23, 35, 49, 101, 196, 260, 325, 520, 988, 1552 и 1863. На каждой мере было проведено пять опытов, в каждом опыте проводилось по пять измерений. Результаты измерений представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Результаты измерения погрешности толщиномера

№ измерения	Значение меры толщины, мкм											
	8	23	35	49	101	196	260	325	520	988	1552	1863
Измерение № 1	0	19	30	64	102	200	261	330	518	1017	1593	1917
Измерение № 2	2	17	28	63	103	199	262	328	518	1008	1596	1919
Измерение № 3	2	22	36	62	103	196	264	327	517	1012	1595	1914
Измерение № 4	1	31	29	63	100	200	267	327	518	1018	1600	1908
Измерение № 5	0	27	38	61	104	198	264	328	519	1006	1595	1915
Измерение № 6	1	23	42	62	105	199	264	327	516	1010	1600	1918
Измерение № 7	3	13	41	62	105	204	264	326	521	1015	1601	1916
Измерение № 8	2	27	36	63	105	202	265	326	521	1015	1594	1918
Измерение № 9	1	18	27	63	102	200	264	325	520	1019	1597	1921
Измерение № 10	2	17	39	63	106	198	266	326	521	1012	1598	1914
Измерение № 11	2	21	26	62	106	204	262	325	521	1015	1591	1913
Измерение № 12	0	15	37	62	104	200	266	329	522	1010	1590	1919
Измерение № 13	0	21	36	63	105	200	265	332	521	1019	1599	1920
Измерение № 14	1	19	39	63	105	198	266	327	521	1018	1596	1918
Измерение № 15	1	14	31	63	102	199	264	333	520	1012	1599	1917
Измерение № 16	2	13	33	63	102	201	263	334	516	1020	1598	1914
Измерение № 17	1	9	26	64	103	204	264	334	519	1017	1597	1911
Измерение № 18	3	18	34	63	105	203	265	328	518	1020	1596	1921
Измерение № 19	1	9	29	63	105	203	262	329	520	1019	1600	1911
Измерение № 20	1	17	32	64	106	203	267	328	517	1018	1599	1908
Измерение № 21	2	16	38	63	104	205	263	328	522	1019	1601	1918
Измерение № 22	3	17	42	62	105	198	265	335	521	1019	1598	1915
Измерение № 23	2	13	41	63	105	200	265	328	520	1020	1599	1921
Измерение № 24	2	12	35	62	106	200	266	331	522	1018	1601	1919
Измерение № 25	0	25	32	62	103	201	267	325	521	1020	1600	1915

На первом этапе была проведена проверка гипотезы о нормальности распределения результатов измерений толщиномером ТМ-20МГ4. Методика проверки приведена в п. 3.2.2, а результаты расчета представлены в таблице 3.6.

По критерию 1 (ГОСТ Р 8.736-2011 [69]) при уровне значимости  $\alpha_1 = 1\%$  и 99% для двадцати пяти измерений квантили распределения  $d_{q/2} = 0,8841$  и  $d_{1-q/2} = 0,7096$ . Сравнивая значения составного критерия  $\tilde{d}$ , приведенного в таблице 3.6, с квантилями распределения, можно заключить, что все измерения, за исключением измерений по мере толщины 8 мкм, имеют нормальное распределение.

По критерию 2 значение  $z_{P/2} \cdot S$ , которое приведено в таблице 3.6, ни одного раза не превысило разности  $(x_i - \bar{x})$ . Это свидетельствует о том, что результаты всех измерений носят нормальный характер распределения.

Таблица 3.6 – Результаты расчета составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011

Критерий	Значение меры толщины, мкм											
	8	23	35	49	101	196	260	325	520	988	1552	1863
1	<b>0,911</b>	0,814	0,873	0,845	0,852	0,836	0,866	0,834	0,883	0,872	0,834	0,828
2	2,3575	13,926	13,111	1,8635	4,0752	6,0469	4,0659	7,3825	4,7700	10,4807	7,7087	9,6678

На втором этапе рассчитаем погрешность толщиномера при измерении по всем мерам толщины для пяти опытов и определим значимость фактора (толщины измеряемого покрытия) на погрешность толщиномера. Погрешность рассчитывалась по методике, приведенной в п. 3.2.1; результаты расчета представлены в таблице 3.7.

Погрешность толщиномера возрастает с увеличением толщины измеряемого покрытия. Поэтому по абсолютной величине погрешности толщиномера оценивать значимость фактора не корректно. Перейдем на относительную погрешность, как отношение абсолютной погрешности к номинальному значению толщины покрытия. Результаты расчета приведены в таблице 3.8.



Таблица 3.7 - Погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 по абсолютной величине, мкм

Толщина меры, мкм	Номер опыта				
	1	2	3	4	5
8	8,2	7,2	8,2	7,5	7,5
23	7,4	10,2	9,1	15,1	12,8
35	8,4	9,5	7,7	8,3	7,8
49	15	14,3	14,3	15,1	14,1
101	3,2	5,5	5,3	5,2	5,0
196	4,6	7,6	7,0	8,1	8,0
260	6,5	5,7	6,7	6,6	7,0
325	4,5	1,8	8,4	9,5	9,1
520	1,1	2,9	1,8	4	2,2
988	30,8	30,4	31,6	32,4	32,2
1552	47	49,4	48,4	47,9	49,4
1863	56	57,5	57,7	56,1	57,8

Таблица 3.8 - Относительная погрешность толщиномера ТМ-20МГ4, мкм

Относительная погрешность толщиномера ТМ-20МГ4						
Толщина меры, мкм	Номер опыта					Среднее
	1	2	3	4	5	
8	1,025	0,9	1,025	0,9375	0,9375	0,965
23	0,321739	0,443478	0,395652	0,656522	0,556522	0,474783
35	0,24	0,271429	0,22	0,237143	0,222857	0,238286
49	0,306122	0,291837	0,291837	0,308163	0,287755	0,297143
101	0,031683	0,054455	0,052475	0,051485	0,049505	0,047921
196	0,023469	0,038776	0,035714	0,041327	0,040816	0,03602
260	0,025	0,021923	0,025769	0,025385	0,026923	0,025
325	0,013846	0,005538	0,025846	0,029231	0,028	0,020492
520	0,002115	0,005577	0,003462	0,007692	0,004231	0,004615
988	0,031174	0,030769	0,031984	0,032794	0,032591	0,031862
1552	0,030284	0,03183	0,031186	0,030863	0,03183	0,031199
1863	0,030059	0,030864	0,030972	0,030113	0,031025	0,030607

Для определения значимости влияния существенного фактора (толщины измеряемого покрытия) на погрешность толщиномера рассчитаем критерий Фишера, определив сначала необходимые параметры:

$a = 12$  – общее число градаций фактора (количество мер толщины покрытий);

$n_i = 5$  – число вариантов в каждом классе градации (число опытов);

$n = \sum_{i=1}^n n_i = 60$  – общее число наблюдений;

$\nu_a = a - 1 = 11$  – число степеней свободы объяснённой дисперсии;

$v_e = n - a = 48$  – число степеней свободы необъяснённой дисперсии,

$v = n - 1 = 59$  – общее число степеней свободы.

Рассчитываем объяснённую влиянием фактора  $a$  сумму квадратов отклонений:

$$SS_a = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2 = 4,524477$$

Необъяснённая сумма квадратов отклонений или сумма квадратов отклонений ошибки:

$$\begin{aligned} SS_e &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (X_{ij} - \bar{X}_i)^2 = \sum_{i=1}^a (n_i - 1) s_i^2 = \\ &= (n_1 - 1) s_1^2 + (n_2 - 1) s_2^2 + \dots + (n_a - 1) s_a^2, = 0,086359 \end{aligned}$$

Рассчитываем дисперсии:

– объяснённая дисперсия

$$MS_a = \frac{SS_a}{a - 1} = 0,411316$$

– необъяснённая дисперсия

$$MS_e = \frac{SS_e}{n - a} = 0,001799$$

Фактическое отношение Фишера

$$F = \frac{MS_a}{MS_e} = 228,6166$$

Критическое значение отношения Фишера:

$$F_{0.05;11;48} = 2,013$$

Фактическое отношение Фишера (228,6166) значительно больше критического (2,013), а значит фактор (толщина измеряемого покрытия) существенно влияет на погрешность толщиномера и данные зависимы от фактора с вероятностью  $P = 0,95$ .

Данный вывод носит качественный характер. Количественные зависимости погрешности толщиномера в зависимости от толщины измеряемого покрытия приведены в таблице 3.7 и на рисунке 3.11.

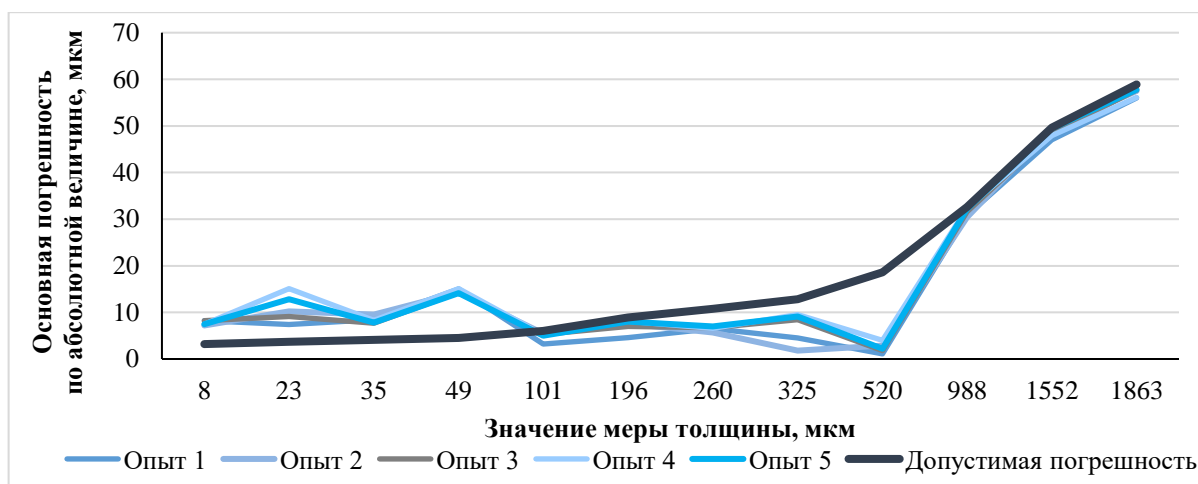


Рисунок 3.11 – Погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 при различной толщине мер

Из графика видно, что:

– погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 при измерении толщины покрытий до 100 мкм существенно превышает допустимое значение. По эксплуатационной документации диапазон измерения составляет от 0 до 2000 мкм. По методике поверки толщиномера ТМ-20МГ4, используют меры толщины покрытий, номинальные значения которых равны, мм:  $0,1 \pm 0,007$ ,  $1 \pm 0,1$ ,  $1,5 \pm 0,15$  и  $2 \pm 0,2$ . Погрешность толщиномера на мерах меньше 100 мкм не оценивается, поэтому они проходят поверку. Данный толщиномер можно рекомендовать для измерения толщины покрытий от 100 до 2000 мкм;

– в диапазоне от 100 до 2000 мкм наблюдается спад погрешности в отдельных поддиапазонах толщины покрытия. Для наглядности построим графическую зависимость относительной погрешности, взятой по среднему значению из пяти опытов, от толщины покрытия (рисунок 3.12). Видно, что минимальная погрешность толщиномера отмечается при измерении толщины покрытия в пределах от 400 до 600 мкм.

С целью нахождения толщины покрытия, при которой основная относительная погрешность достигает минимального и максимального значений была проведена интерполяция экспериментально полученных точек с последующим сглаживанием непрерывной кривой методом наименьших квадратов.

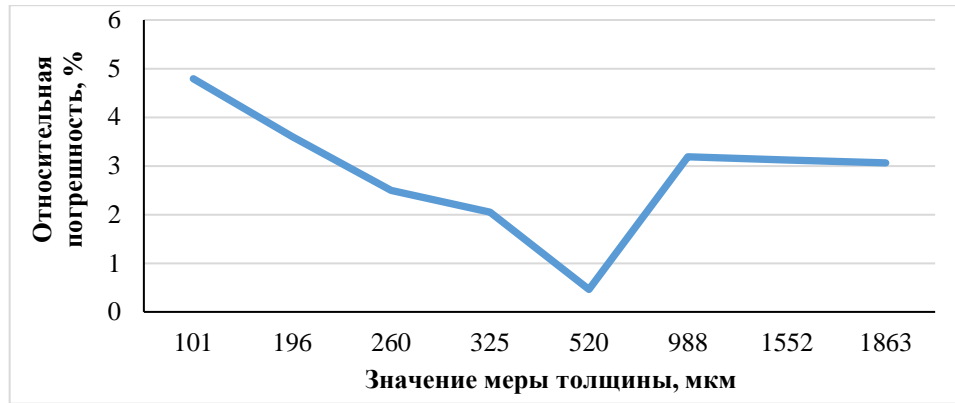


Рисунок 3.12 – Относительная погрешность толщиномера ТМ-20МГ4 в диапазоне от 100 до 2000 мкм

Для этого по экспериментальным точкам (рисунок 3.12) была построена плавная кривая, установлена ее математическая зависимость и найдены упомянутые точки. Набор экспериментальных точек приведен в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Набор экспериментальных точек

№	1	2	3	4	5	6	7	8
X	101	196	260	325	520	988	1552	1963
Y	4,8	3,6	2,5	2,0	0,46	3,2	3,2	3,1

Задачу определения непрерывной математической функции решали посредством использования интерполяционных методов [112, 113]. Таблица 3.8 содержит небольшое число точек, поэтому предпринимались попытки найти зависимость интерполяционными методами Лагранжа и Ньютона [113]. Однако, расчеты показали, что данные интерполяционные полиномы в левой области диапазона точек давали осцилляции недопустимо большой амплитуды. Выход был найден в использовании кубического В-сплайна Шёнберга [115] вида

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3, i = 1, 2, \dots, n., \quad (3.10)$$

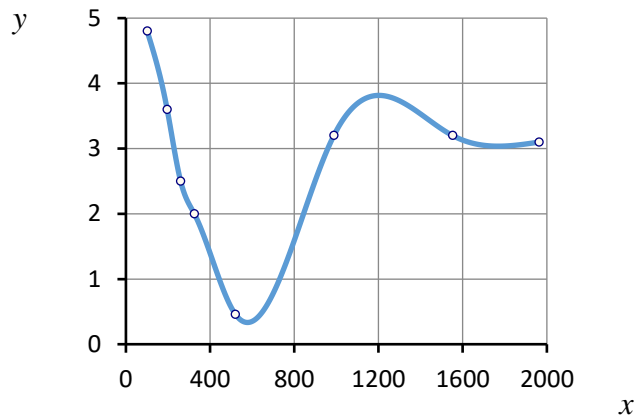
где  $n = 8$ .

Коэффициенты В-сплайна, построенного по точкам таблицы 3.9, представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Коэффициенты В-сплайна

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8
$a_i$	4,8	3,6	2,5	2,0	0,46	3,2	3,2	3,1
$b_i$	-0,251	0,025	0,014	0,002	-0,003	-0,003	0,003	0,004
$c_i$	0,001	7,12E-5	-0,0001	2,19E-6	-3,41E-5	1,71E-5	-3,21E-6	-2,15E-6
$d_i$	1,898E-5	-3,43E-6	-1,12E-6	1,16E-6	-2,41E-8	4,13E-8	-8,14E-9	-5,38E-9

На рисунке 3.13 показан график функции  $y(x)$ , представляющий В-сплайн.

Рисунок 3.13 - График В-сплайна  $y(x)$ 

Из графика видно, что в районе искомого минимума и максимума интерполянта функция  $y(x)$ , имеет визуально заметный излом вблизи третьей точки таблицы 3.9, который объясняется погрешностями измерений. Данный излом необходимо сгладить, предварительно установив вероятную точку максимальной погрешности интерполянта и исправив значение ее ординаты.

В результате оптимизации найдено оптимальное значение ординаты третьей точки. Наилучший результат при сглаживании изломов функций  $y(x)$  и  $g(x)$  можно получить за счет коррекции значения данной ординаты, заменив ее исходное значение 2,5 на 2,814. В этом случае сглаженная функция принимает вид плавной кривой, которая показана на рисунке 3.14.

Желаемые экстремумы сглаженной кривой несложно найти, если принять во внимание, что они находятся в точках, где первая производная  $g(x)$  обращается в нуль. Поскольку В-сплайн на сегментах между точками представляет собой кубическую функцию, то первая производная  $g(x)$  является квадратичной функцией. Решив квадратные уравнения в точках нулей функции  $g(x)$  и выполнив

контроль типа экстремумов при помощи второй производной функции  $y(x)$ , нашли искомые экстремумы:  $(X_{\min}; Y_{\min}) = (534,7; 0,453)$ ,  $(X_{\max}; Y_{\max}) = (1180; 3,450)$ .

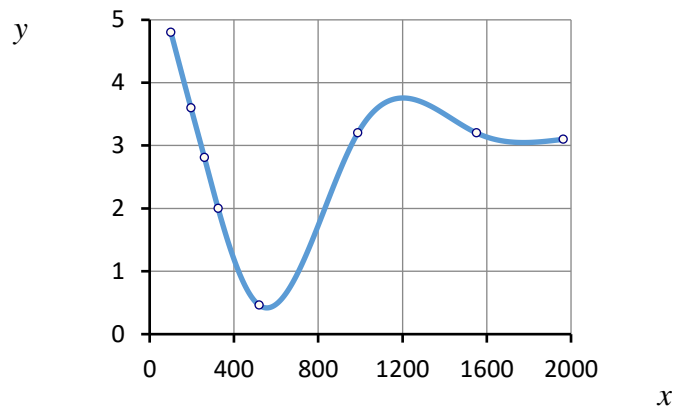


Рисунок 3.14 - Сглаженная кривая B-сплайна  $y(x)$  в районе искомых экстремумов

Для расчета экстремальных значений погрешностей магнитных толщиномеров других моделей разработана Программа расчета параметров экстремальных погрешностей магнитного толщиномера, зарегистрированной в Реестре программ для ЭВМ [128].

Одним из путей повышения точности толщиномера покрытия является калибровка его по двум точкам (настройка диапазона измерений). При этом сначала проводится нулевая калибровка, а затем калибровка по мере, толщина которой близка к измеряемой толщине покрытия.

На первом этапе при настройке диапазона измерений калибровку проводили по каждой мере и на этой же мере проводили измерения и определяли основную погрешность. Результаты исследования представлены на рисунке 3.15.

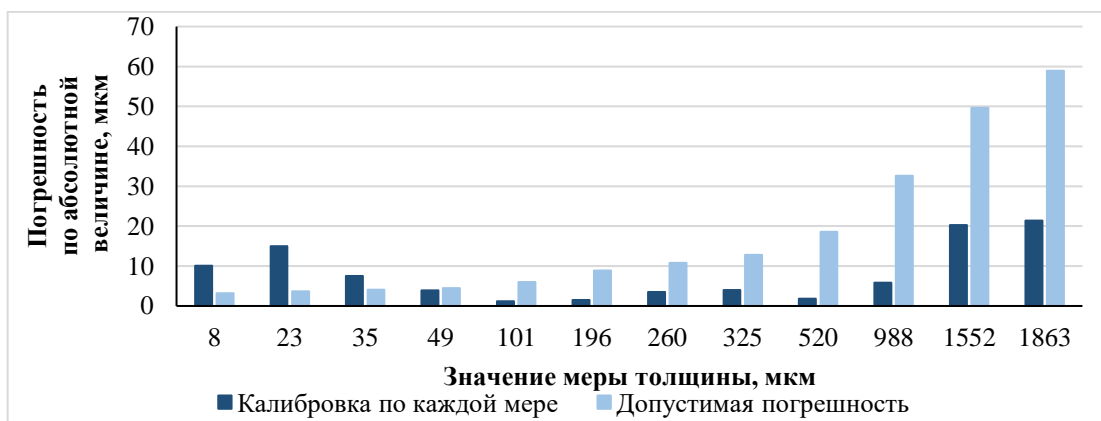


Рисунок 3.15 – Оценка погрешности при калибровке толщиномера по каждой мере

На втором этапе при настройке диапазона измерений калибровку проводили сначала по мере толщиной 196 мкм, а измерения при этой настройке проводились по всем мерам толщины (рисунок 3.16), затем калибровку проводили по мере толщиной 520 мкм и повторяли измерения по всем мерам.

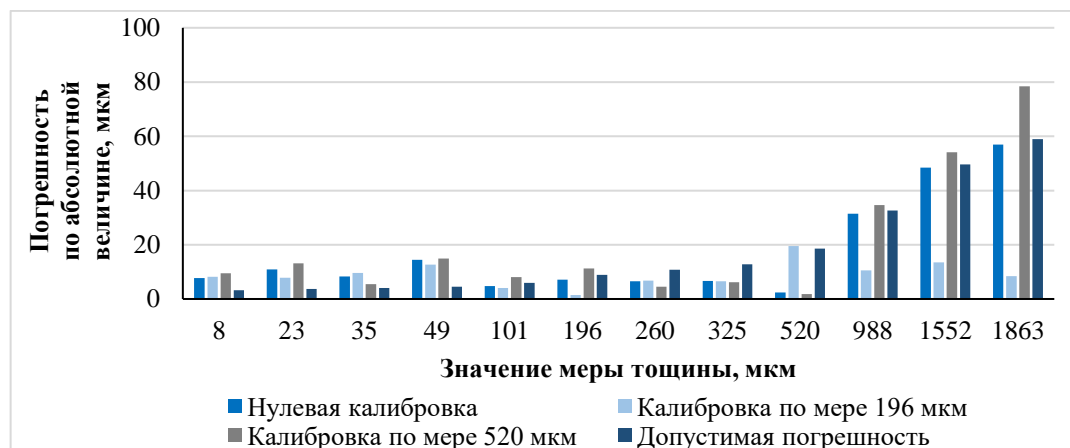


Рисунок 3.16 – Оценка погрешности при калибровке толщиномера по мерам толщиной 196 мкм и 520 мкм

Результаты экспериментальных исследований толщиномера покрытия ТМ-20МГ4 показали, что при настройке диапазона измерений:

- применение двухточечной калибровки при измерении толщины покрытий до 100 мкм не повышает точность толщиномера, т. е. погрешность измерения (рисунки 3.15 и 3.16) как и при нулевой калибровке (рисунок 3.11) превышает допустимые значения. Это объясняется высокой долей случайной составляющей в суммарном значении основной погрешности;

- в диапазоне толщины покрытия от 100 до 2000 мкм применение двухточечной калибровки способствует снижению погрешности измерения в два и более раза, но для этого необходимо знать номинальное значение измеряемой толщины покрытия, что практически невозможно по многим причинам, в том числе из-за отсутствия нормирования точности толщины покрытий;

- при измерении толщины покрытия, значение которой отличается от толщины меры, по которой осуществлялась двухточечная калибровка, может не только снижать погрешность измерения, но и существенно увеличивать (рисунок 3.16), превышая допустимое значение.

### 3.2.7 Экспериментальная оценка погрешности толщиномеров ТТ210 и ТТ220

На следующем этапе исследований экспериментальной проверке подвергались магнитные толщиномеры моделей ТТ210 и ТТ220, зарегистрированные в Государственном реестре средств измерений.

Магнитные толщиномеры ТТ210 и ТТ220 имеют сходные характеристики: пределы измерений от 0 до 1250 мкм; погрешность измерения в зависимости от толщины  $h$  измеряемого покрытия составляет  $\pm(0,03h+1)$ . Отличительной особенностью является то, что толщиномер ТТ210 имеет разрешение 0,1 мкм, а толщиномер ТТ220 – 1 мкм. При этом, как показано выше, погрешность измерения данными приборами одинакова.

Экспериментальная оценка погрешности приборов ТТ210 и ТТ220 проводилась по мерам, которые использовались для оценки толщиномера ТМ-20МГ4 (адекватность использования мер толщины была показана выше), но для толщиномеров было использовано основание, которое прилагается в комплекте прибора.

Результаты исследования толщиномера ТТ210 приведены на рисунках 3.17, 3.18.

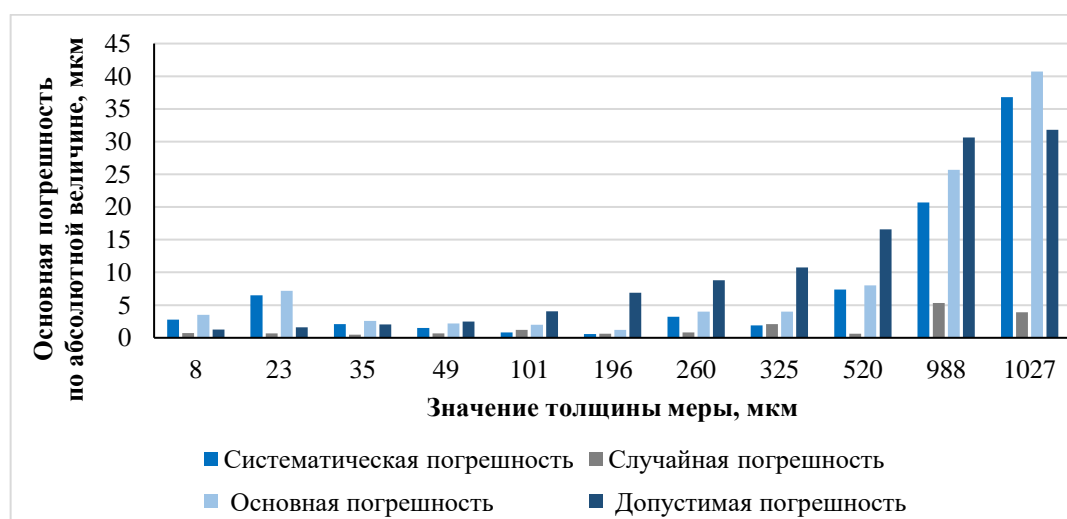


Рисунок 3.17 – Зависимость погрешности толщиномера ТТ210 от величины меры толщины при нулевой калибровке



Проверка основной погрешности и ее составляющих при нулевой калибровке выявила (рисунок 3.17), что основная погрешность толщиномера при измерении толщины покрытия до 50 мкм и свыше 1000 мкм превышает допустимое значение погрешности, указанное в эксплуатационной документации.

Для повышения точности измерения рекомендуется перед проведением измерения проводить калибровку по двум точкам: сначала проводится нулевая калибровка, а затем - по мере толщины, значение которой близко к измеряемой величине. При проведении эксперимента использовали идеальный случай, т.е. перед измерением толщины каждой меры проводили двухточечную калибровку по этой же мере, с надеждой получить такой же идеальный результат (на практике измерение и проводится для того, чтобы найти измеряемую толщину покрытия). Сравнение основной погрешности толщиномера ТТ210 при нулевой калибровке и калибровке по двум точкам представлено на рисунке 3.18.

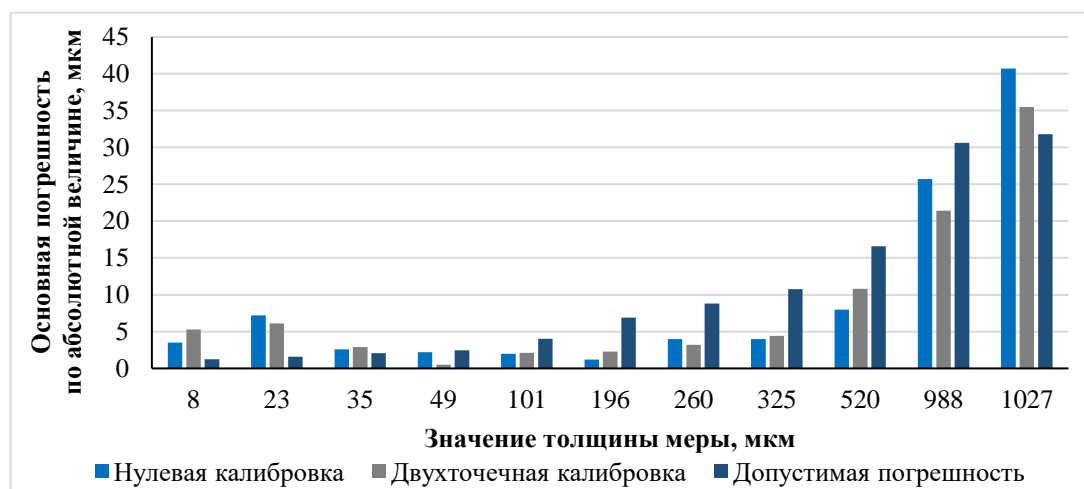


Рисунок 3.18 – Сравнение основной погрешности толщиномера ТТ210 при нулевой и двухточечной калибровках

Из графиков видно, что применение двухточечной калибровки даже в идеальном варианте не расширяет диапазон измерений, в котором основная погрешность не превышает допустимого значения. Кроме того, погрешность при двухточечной калибровке может как незначительно снижаться в сравнении с погрешностью при нулевой калибровке (меры толщины 988 мкм, 1027 мкм и др.), так и незначительно увеличиваться (меры толщины 325 мкм, 520 мкм и др.).

Аналогичные исследования проведены и для толщиномера ТТ220, результаты при нулевой калибровке представлены на рисунке 3.19.

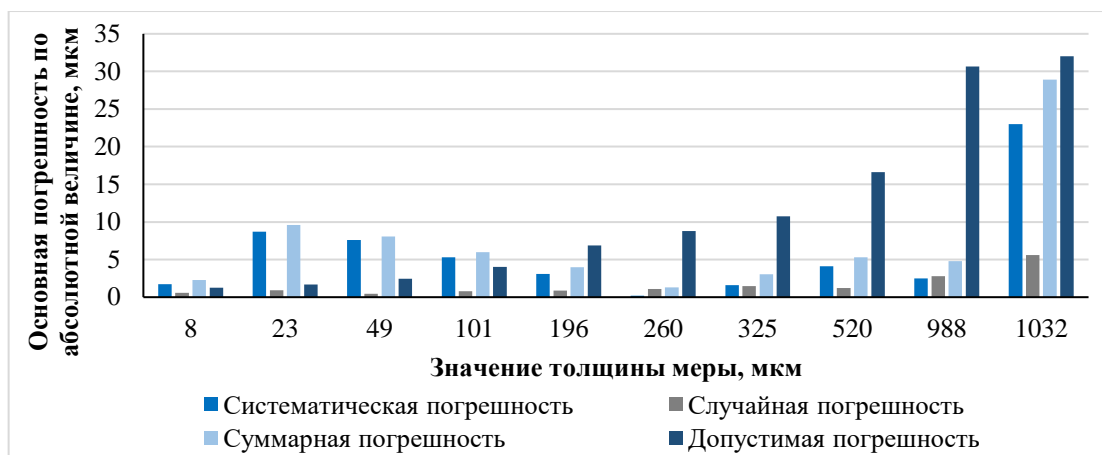


Рисунок 3.19 – Зависимость погрешности толщиномера ТТ220 от величины меры толщины

Анализ показал, что при измерении толщиномером ТТ220 при нулевой калибровке толщины покрытий до 100 мкм погрешность толщиномера в два и более раза превышает допустимые значения, которые указаны в эксплуатационной документации.

В отличие от толщиномера ТТ210 погрешность исследуемого толщиномера в конце диапазона измерений не выходит за пределы допустимых значений. Следовательно, толщиномер ТТ220 можно рекомендовать для измерения в диапазоне от 100 до 1250 мкм.

Необходимо напомнить, что рекомендации, приведенные в этом разделе, справедливы для случая, когда толщина основания, на которое нанесено покрытие, близко к толщине основания, по которому осуществлялась калибровка толщиномеров.

В результате проведенных исследований и на основе предложенных рекомендаций была разработана методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров, которая представлена в Приложении Г, акт внедрения в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва» представлен в Приложении Д.

### 3.3 Выводы по третьей главе

1. Исследования 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.

2. В технической документации 30 толщиномеров из 63 исследуемых указан интервал измерения, который начинается с нуля, что не может обеспечить ни один толщиномер покрытий. Кроме того, нижнее значение диапазона измерений не увязано с погрешностью толщиномера. Следовательно, указанное в технической документации значение нижнего диапазона измерений является недостоверной информацией для потребителей.

3. Представлены числовые значения нормирования погрешности толщиномеров в зависимости от интервалов толщины и степени точности покрытия. Это позволит обоснованно назначать наименьшее значение измеряемой прибором толщины покрытия и в дальнейшем выбирать толщиномеры по точности.

4. Разработан порядок проведения экспериментальных исследований магнитных толщиномеров покрытий. Показано, что оптимальным количеством измерений при нахождении действительного значения толщины покрытий или оценки погрешности толщиномеров является пять измерений. Распределение результатов измерений погрешности толщиномеров соответствует нормальному, а фактор (толщина измеряемого покрытия) существенно влияет на погрешность толщиномера и данные зависимы от фактора с вероятностью  $P = 0,95$ .

5. При экспериментальной оценке погрешности толщиномера ТМ-20МГ4 по прилагаемому в комплекте прибора основанию выявлено, что:

- экспериментально показано, 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 настройку диапазона измерений (двухточечная калибровка);

– 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 [128];

– 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.

6. Сравнительные эксперименты по оценке точности толщиномеров ТТ210 и ТТ220 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 неприемлем 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.

7. 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.

## **ГЛАВА 4. ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ В ИНТЕРВАЛЕ ВЛИЯЮЩИХ ВЕЛИЧИН**

Одной из основных метрологических характеристик толщиномеров покрытий является погрешность, которую можно разложить на две составляющие: погрешность самого прибора и погрешности в интервале влияющих величин. В эксплуатационной документации толщиномеров покрытий приводится допустимая погрешность и в ряде случаев – ограничения влияющих величин. Например, для толщиномера ТТ220 установлено, что данным прибором можно измерять толщину покрытия, нанесенного на основание толщиной 0,5 мм и более, а минимальный диаметр детали, на которую нанесено покрытие, не должен превышать 7 мм. Более подробный анализ эксплуатационной документации толщиномеров покрытий, в которой отражаются особенности влияющих величин, приведен в главе 2.

В данном разделе на основе экспериментальных данных отдельных толщиномеров покрытий выработаны рекомендации по снижению погрешности измерений и повышению достоверности результатов измерений. Из большинства факторов, которые влияют на точность измерения толщины покрытия и приведены в ГОСТ 31993-2013 [14], экспериментально исследовано влияние толщины основания, кривизна поверхности и краевой эффект.

### **4.1 Анализ нормативной документации на показатели качества толщиномеров**

#### **4.1.1 Система показателей качества продукции**

Качество продукции в современной рыночной экономике относится к числу важнейших показателей деятельности предприятия. Чтобы быть конкурентоспособным, удовлетворить потребности потребителя и приносить

соответствующую прибыль производитель должен обеспечить высокое качество своей продукции.

Свойства продукции могут быть охарактеризованы качественно (например, соответствие изделия определённому цвету, дизайну и т.д.) и количественно, то есть определены показателем качества продукции [91].

Показатель качества продукции характеризуется одним или несколькими свойствами продукции применительно к определённым условиям её создания, эксплуатации (потребления) и позволяют комплексно оценивать соответствие продукции установленным требованиям.

Основное место в оценке качества продукции отводится потребителю, поэтому продукция должна соответствовать требованиям потребителя, а в эксплуатационной документации должна быть представлена достоверная и подробная информация, позволяющая потребителю судить о качестве продукции.

Каждая продукция обладает своей номенклатурой показателей, которая в виде технических требований входят в состав технического задания на разрабатываемую продукцию и технических условий.

Нормирование определенной номенклатуры показателей качества однородной продукции является важным не только для потребителя продукции, но и для изготовителя, который оценивает рынок и планирует показатели качества своей продукции на всех этапах жизненного цикла продукции.

Для возможности объективной оценки качества внутри однородной продукции нужны номенклатура и, при необходимости, требования, характеризующие показатели качества, которые закреплены в определенной нормативной документации. Это соответствует одной из важнейших задач стандартизации. Кроме того, решение данных задач облегчит внедрение цифровых технологий для оценки качества продукции на всех этапах ее жизненного цикла.

Номенклатура показателей качества продукции установлена в национальных (межгосударственных) стандартах серии «Система показателей качества продукции», количество которых в настоящее время более трехсот [92].

#### **4.1.2 Анализ нормативной документации в области показателей качества толщиномеров**

При разработке межгосударственных стандартов серии «Система показателей качества продукции» применялись требования, приведенные в РД 50-64-84 «Методические указания по разработке государственных стандартов, устанавливающих номенклатуру показателей качества групп однородной продукции».

С 04.02.2019 года РД 50-64-84 отменены на территории РФ, но разработанные на их основе стандарты продолжают действовать. Одной из причин отмены РД 50-64-84 является то, что они определяли не только порядок установления номенклатуры показателей качества и требования к установлению основных показателей качества групп однородной продукции, но и порядок построения, содержания и изложения вновь разрабатываемых или пересматриваемых стандартов системы показателей качества продукции. А вторая часть требований к моменту отмены РД 50-64-84 существенно изменилась.

Основными областями применения номенклатуры показателей качества продукции являются: технические задания на научно-исследовательские работы по определению перспектив развития группы однородной продукции; государственные (межгосударственные) стандарты общих технических требований; вновь разрабатываемые и пересматриваемые стандарты на продукцию; технические задания на опытно-конструкторские работы; технические условия; карты технического уровня и качества продукции.

По характеризующим свойствам выделяют следующие группы показателей качества:

- показатели назначения (характеризуют область применения продукции);
- показатели надежности (характеризуют свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости);
- экономические показатели (характеризуют затраты на разработку,



изготовление, эксплуатацию (потребление) продукции);

- эргономические показатели (характеризуют систему «человек – изделие»);
- эстетические показатели (характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции и т.п.);
- экологические показатели (характеризуют уровень вредных воздействий на окружающую среду);
- показатели безопасности (характеризуют безопасность продукции при её эксплуатации (потреблении) для человека).

Кроме перечисленных групп показателей могут применяться и показатели, характеризующие другие специфические свойства в зависимости от особенностей продукции и условий ее применения, а также показатели, относящиеся к условиям разработки, изготовления и транспортирования продукции. И наоборот, некоторые из перечисленных групп не характерны для отдельных видов продукции и поэтому не применяются для характеристики их качества.

Номенклатуру показателей на толщиномеры покрытий нормирует ГОСТ 4.177-85 «Система показателей качества продукции. Приборы неразрушающего контроля качества материалов и изделий. Номенклатура показателей» [93], устанавливающий перечень основных показателей качества магнитных, вихретоковых и электрических приборов. Перечень показателей приведен в таблице 4.1.

#### **4.1.3 Сравнительный анализ технических характеристик толщиномеров с показателями качества и выработка рекомендаций по повышению качества эксплуатационной документации**

Номенклатуру показателей на магнитные и токовихревые толщиномеры нормирует ГОСТ 4.177-85 [93], в таблице 3 которого приведены основные показатели качества магнитных, вихретоковых и электрических приборов в целом, а в таблице 10 приведена применяемость показателей качества приборов для

контроля геометрических размеров материалов и изделий.

В результате обработки данных, приведенных в таблицах 3 и 10 ГОСТ 4.177-85 [93], были отобраны показатели качества, которые относятся к магнитным и токовихревым толщиномерам, и внесены в первый столбец таблицы 4.1.

На следующем этапе был проведен анализ эксплуатационной документации серийно выпускаемых магнитных и токовихревых толщиномеров.

Модели толщиномеров, их технические характеристики, приведенные в эксплуатационной документации, внесены в столбцы 2 – 11 таблицы 4.1. Таким образом, в данной таблице показана связь показателей качества с техническими характеристиками средств измерений толщины покрытий.

Таблица 4.1 – Соответствие технических характеристик показателям качества для различных толщиномеров покрытий

Наименование показателя качества по ГОСТ 4.177-85	Модель толщиномера покрытий									
	ТМ-20МГ4	ТТ-210	ЛКП-ЕТ111	ИТДП-11	МТ 2003	МТ 2007	МТП-01	ЕТ-14	ТМ-2	УТ 341
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Показатели назначения										
1.1. Показатели функциональные и технической эффективности										
1.1.4 Диапазон измерения контролируемого параметра	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1.1.5 Предел допускаемой основной и дополнительной погрешностей измерения контролируемого параметра	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
1.1.7 Производительность контроля или время одного измерения				+			+			
1.1.8. Параметры контролируемого объекта, ограничивающие область применения	+	+				+		+		
1.1.9 Автоматическая отстройка от влияющих факторов										
1.1.10 Время непрерывной работы от одного комплекта батарей или аккумуляторов, ч				+	+	+	+			+
1.1.11 Документирование результатов контроля						+				
1.1.12. Подготовка к работе с использованием или без использования стандартных образцов или мер толщины					+	+	+			

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1.1.13. Наличие встроенных средств диагностики технического состояния прибора и элементов самопроверки					+		+			
1.1.14 Отличительные особенности										
1.2 Конструктивные показатели										
1.2.1 Габаритные размеры, мм	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
1.3 Показатели стойкости к внешним воздействиям										
1.3.1 Предел температуры окружающей среды, °С		+	+	+	+	+		+	+	+
1.3.2. Устойчивость к воздействию влажности окружающей среды, %		+	+	+	+	+		+	+	+
2. Показатели надежности										
2.1. Показатели безотказности										
2.1.1 Вероятность безотказной работы или средняя наработка на отказ, ч. цикл	+						+		+	
2.1.2 Установленная безотказная наработка, ч							+	+		
2.2 Показатели долговечности										
2.2.1 Установленный срок службы, лет					+	+			+	
2.2.2 Полный средний срок службы, лет	+				+		+			
2.3 Показатели ремонтпригодности										
2.3.1 Среднее время восстановления работоспособного состояния, ч						+	+			
3. Показатели экономного использования сырья, материалов, топлива и трудовых ресурсов										
3.1. Масса, кг	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
3.2. Потребляемая мощность, В А	+									
4. Эргономические показатели										
4.2 Показатель уровня шума										
7. Показатель транспортабельности										
7.1 Устойчивость к транспортной тряске										
Разрешение для минимального размера, мм	+	+					+			
Характеристика мер толщины	+				+					
Источник питания (батарейки: тип, напряжение, количество)		+	+	+	+	+	+		+	+

В результате проведенного исследования установлено:

1. Технические и метрологические характеристики, приведенные в эксплуатационной документации толщиномеров, существенно отличаются от номенклатуры показателей качества продукции, регламентированной ГОСТ 4.177-85 [93]. Их количество в соотношении с количеством показателей качества,

нормированных данным стандартом, колеблется от 27 до 59 процентов (рисунок 4.1) [94].

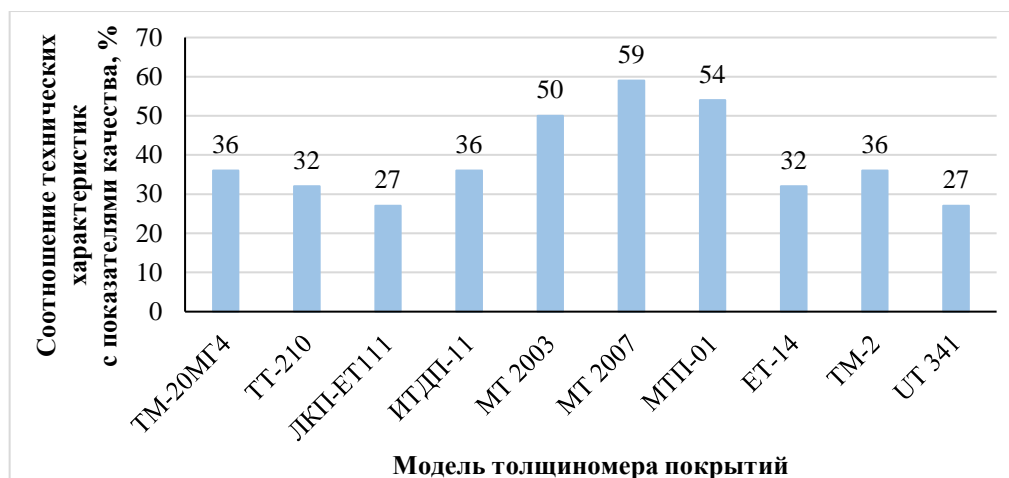


Рисунок 4.1 – Соотношение технических характеристик с показателями качества для различных моделей толщиномеров покрытий

Для каждого прибора указаны следующие характеристики: диапазон измерения; допускаемая погрешность или точность прибора; масса; габаритные размеры; показатели стойкости к внешним воздействиям.

Допускается, что отсутствие некоторых других показателей качества (например, уровень шума) может быть просто не актуальным для толщиномеров. Однако, отсутствие показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности в документации у 20-30 процентов исследуемых толщиномеров существенно ограничивает возможности для обоснованного выбора потребителя и идет в разрез с ФЗ «О защите прав потребителей» в части статьи 8 «Право потребителя на информацию» [61].

2. Наименования характеристик, указанных в эксплуатационной документации исследуемых толщиномеров, не соответствуют наименованиям показателей качества, установленных ГОСТ 4.177-85 [93], что затрудняет сравнительный выбор потребителя среди разных приборов. Например, ГОСТ 4.177-85 [93] регламентирует наименование показателя: «1.1.5 Предел допускаемой основной и дополнительной погрешностей измерения контролируемого параметра», но в документации на исследуемые толщиномеры

данный показатель называется по-разному: у ТТ210 и ЛКП-ЕТ111 указана «точность»; у ТМ-20МГ4 – «предел допускаемой абсолютной погрешности измерений»; у ТМ-2 - «предел допускаемой относительной погрешности измерений»; у ЕТ-14 – «допустимое отклонение измерения». Кроме того, в документации на толщиномер ТТ210 отмечено и некорректное наименование характеристики: вместо термина «масса» используется термин «вес».

3. Отдельные характеристики приборов приводятся в эксплуатационной документации не в соответствующем разделе, а в отдельных подразделах, что создаёт неудобство потребителю при изучении и сравнении характеристик толщиномеров. Например, для прибора ТМ-20МГ4 «параметры контролируемого объекта, ограничивающие область применения (геометрические, электрические, магнитные и т. п.)» приведены не в технических характеристиках, а отдельным подразделом руководства по эксплуатации.

4. Установленный ГОСТ 4.177-85 [93] показатель качества «1.1.14 Отличительные особенности», представляющий информацию потребителю о преимуществах конкретного прибора, не указан ни у одного из исследуемых толщиномеров. Хотя размещение «визитной карточки» прибора на первом плане – прямая ориентация на потребителя.

Следовательно, для повышения конкурентоспособности выпускаемых толщиномеров покрытий в технических условиях и эксплуатационной документации необходимо технические и метрологические характеристики формировать с учетом требований ГОСТ 4.177-85 [93].

#### **4.1.4 Факторы, влияющие на точность результатов измерений толщины покрытий**

Факторы, влияющие на точность измерения толщины покрытий магнитными и токовихревыми толщиномерами, установлены в ГОСТ 31993-2013 [14]. Их перечень представлен на рисунке 4.2.

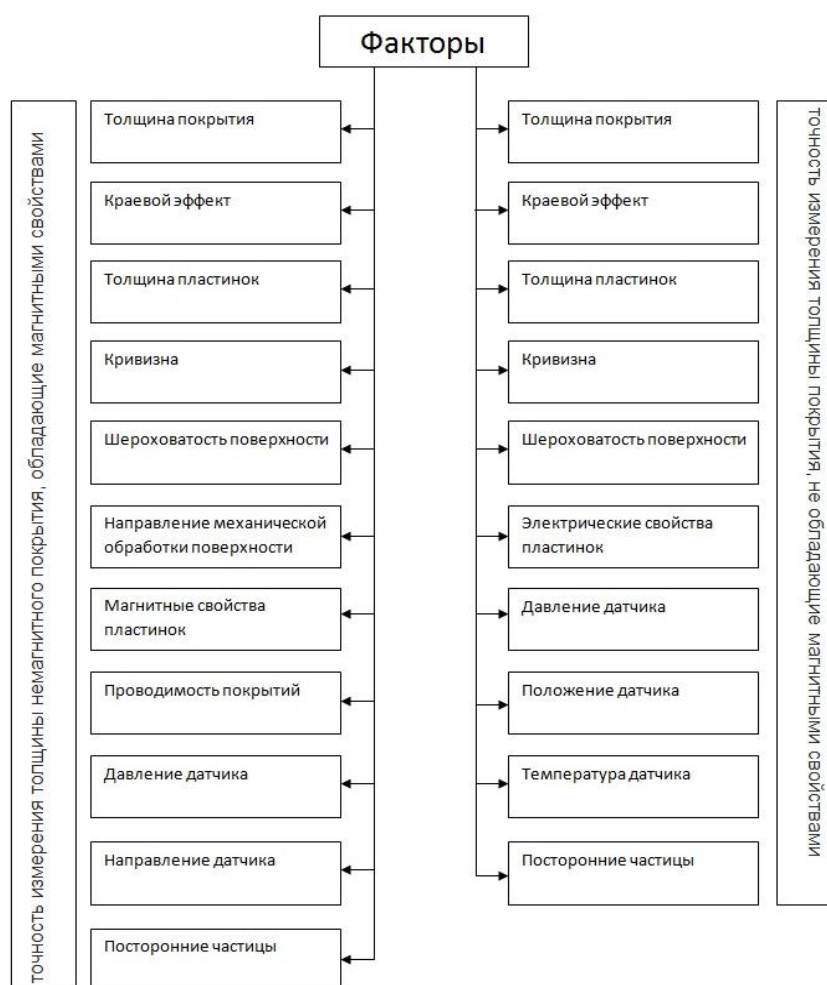


Рисунок 4.2 – Факторы, влияющие на точность измерений

Данные факторы можно рассматривать как метрологические характеристики, в частности как параметры, ограничивающие область применения толщиномера покрытий. Количественное значение параметров должно указываться в технической документации на толщиномер покрытия. Это означает то, что в пределах указанного значения параметра, ограничивающего область применения, погрешность прибора не должна превышать допустимого значения.

Представим краткую характеристику перечисленным факторам:

1. Толщина покрытия. Погрешность толщиномеров зависит от значения измеряемой толщины покрытий, поэтому допустимую величину погрешности в большинстве случаев нормируют в относительных единицах.

2. Краевой эффект может выражаться допустимым расстоянием от точки измерения до края измеряемого образца либо ограничивать габаритные размеры измеряемой поверхности.

3. Толщина пластинок. Под толщиной пластинок следует понимать толщину основания, на которое нанесено покрытие. Минимальное значение толщины основания, которое не влияет на погрешность прибора, должно указываться в технической документации на толщиномер.

4. Шероховатость поверхностей как основания, так и покрытия влияет на форму толщины покрытия. Калибровать толщиномер необходимо на той же поверхности, которую контролируют с покрытием.

5. Кривизна измеряемой поверхности может существенно влиять на результат измерения. В технической документации необходимо указывать допустимое значение кривизны либо использовать специальные образцы для калибровки толщиномеров.

6. Направление механической обработки поверхности оказывает влияние на приборы, имеющие двухполюсный датчик или неравномерно изношенный однополюсный датчик. Показания прибора зависят от ориентации датчика на поверхности.

7. Магнитные свойства пластинок. Свойства остаточного магнетизма основания оказывают влияние на точность измерения толщины покрытия, нанесенного на данное основание магнитным методом.

8. Проводимость покрытия. На показания магнитных приборов, которые работают в диапазоне частот 200 – 2000 Гц, могут влиять вихревые токи, возникающие в толстых хорошо проводящих покрытиях.

9. Давление датчика. Датчик прибора должен оказывать постоянное давление на покрытие, но при этом не деформируя его.

10. Направление датчика. На показания приборов, основанных на принципе магнитного притяжения, влияет направление магнита по отношению к гравиметрическому полю земли. Работа датчика прибора с горизонтальной или

вертикальной ориентацией требует дифференцированной калибровки, иначе работа невозможна.

11. Посторонние частицы. Для физического контакта датчиков приборов с контролируемой поверхностью необходимо обеспечить чистоту поверхности покрытия и наконечника датчика.

Далее проведен анализ эксплуатационной документации (руководств по эксплуатации или паспортов) 13 толщиномеров покрытий.

На первом этапе исследования для каждого толщиномера выявляли количество факторов, указанных в его эксплуатационной документации (рисунок 4.3).

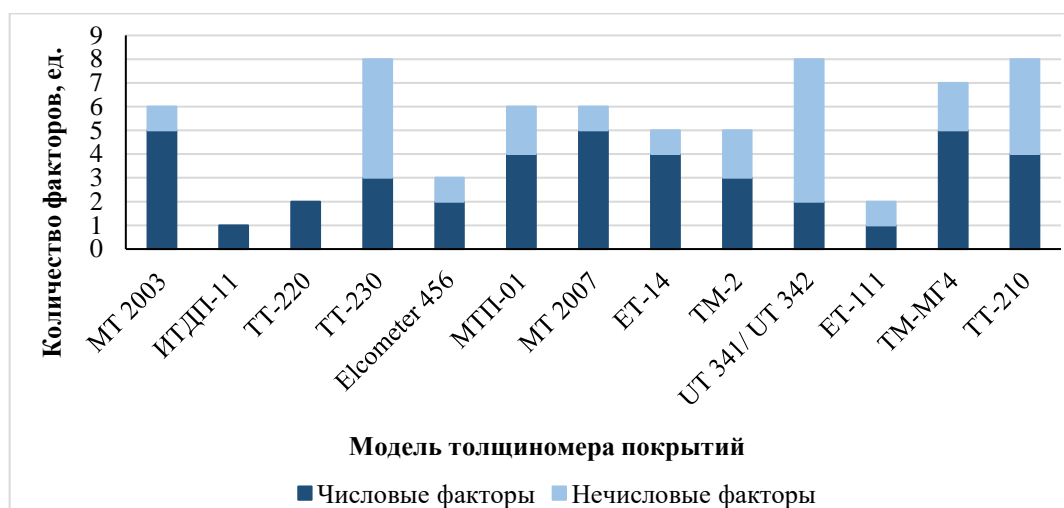


Рисунок 4.3 – Количество факторов, влияющих на точность измерения, приведенных в эксплуатационной документации различных толщиномеров

Проведенный анализ показал, что ни один из 13 исследуемых толщиномеров в своей эксплуатационной документации не отражает все влияющие факторы (рисунок 4.3). Следовательно, потребители данной продукции из-за отсутствия надлежащей информации могут приобрести толщиномер, не соответствующий их потребностям, а при измерении толщины покрытия получать результаты с заведомо большей погрешностью.

Кроме того, выявлено, что часть из указанных факторов в эксплуатационной документации представлены числовыми значениями (синий цвет на рисунке 4.3), а часть факторов указаны словесным описанием (голубой цвет на рисунке 4.3).



Например, «кривизна тестируемого объекта имеет некоторое влияние на измерения, которое очевидно увеличивается с уменьшением радиуса кривизны». Такое описание фактора несет ограниченную информацию и не дает рекомендаций потребителю по снижению погрешности измерений.

Проведенные исследования показали, что наиболее информативны толщиномеры моделей МТ-2003, МТ-2007, ТМ-20МГ4. Значительно ограничена информация в документации толщиномеров моделей ИТДП-11 и ЕТ-111.

На втором этапе исследования проведен количественный анализ отражения различных факторов в эксплуатационной документации толщиномеров. Видно, что только один фактор (толщина покрытия, которую можно измерить данным прибором) приведен для всех исследуемых толщиномеров (рисунок 4.4).

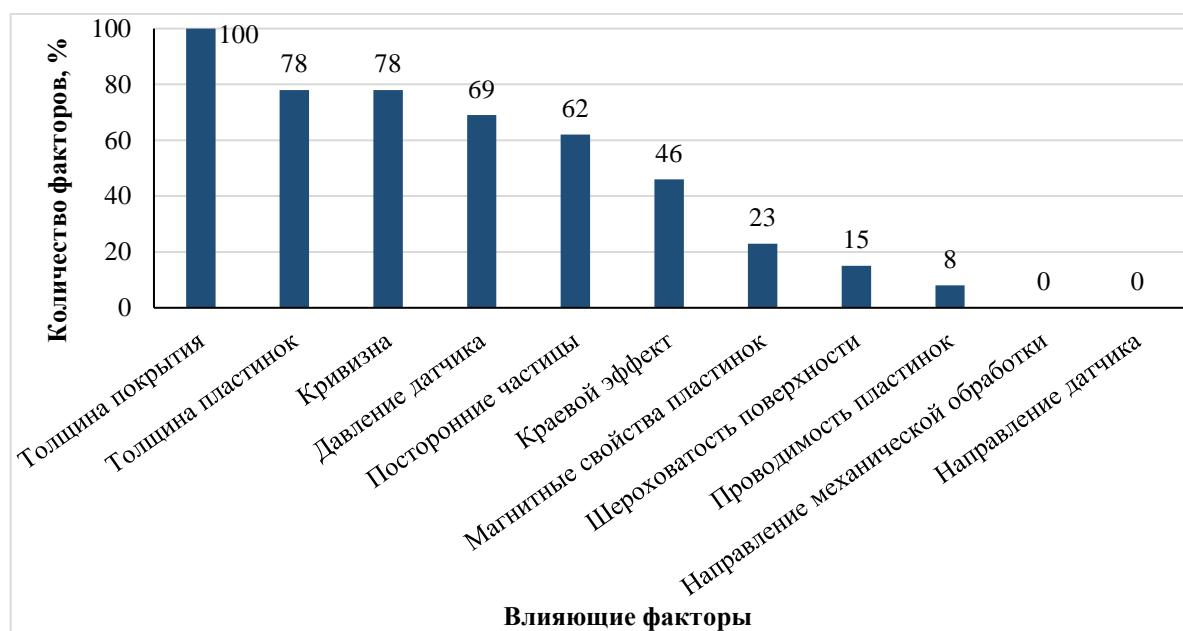


Рисунок 4.4 – Процентное соотношение факторов, приведенных в эксплуатационной документации толщиномеров

По результатам исследований можно сделать выводы, что в эксплуатационных документах на толщиномеры перечислены не все факторы, которые приводятся в ГОСТ 31993-2013 и влияют на точность измерения магнитными толщиномерами. Это подтверждается и исследованиями в области информации показателей качества толщиномеров [94].

Ограниченные (неполные, субъективные и т.п.) или отсутствующие сведения, характеризующие погрешность толщиномера при измерении толщины покрытий в условиях влияющих факторов, приведут к недостоверным результатам измерений и нарушают ФЗ «О защите прав потребителей» [61] в части права потребителя на достоверную информацию.

Но стоит отметить и позитивный момент: в документации на отдельные модели толщиномеров разработчики отражают некоторые характеристики не формально, а с учетом особенностей, не предусмотренных ГОСТ 31993-2013 [14]. Например, в описании фактора «кривизна» указывается радиус не только выпуклой, но и вогнутой поверхности, что важно при измерении толщины покрытий на поверхности сложной формы.

## **4.2 Исследование влияния толщины основания на погрешность измерения магнитными толщиномерами**

### **4.2.1 Анализ толщины оснований изделий и материалов при нанесении на них покрытий**

Как было указано ранее покрытия применяются в машиностроении, космической и авиационной технике, строительстве, при создании бытовой техники и т.п. Отсюда следует, что толщина основания, на которое наносится покрытие, определяется размерами деталей или материалов и находится в очень широком диапазоне.

ГОСТ 31993-2013 [14] определяет понятие критической толщины основания, выше которой увеличение толщины не влияет на точность измерения магнитными толщиномерами. Минимальная толщина основания (критическое значение) должно быть указано в эксплуатационной документации каждого толщиномера.

Приведем примеры нанесения покрытий на относительно тонкие основания:

1. Автомобили. В качестве материала для кузовов легковых автомобилей

применяется высокопрочная листовая сталь толщиной от 0,4 до 1,5 мм, позволяющая снизить массу применяемых деталей кузова на 25% при сохранении их прочности [118].

Например, в производстве автомобилей марки Ford Focus используется холоднокатаный лист толщиной от 0,4 до 1,5 мм, из которого отпрессованы внешние панели и элементы пола [119]. У российских автомобилей моделей ВАЗ толщина металла кузова составляет 0,6 мм на Гранте и 0,8 мм у Лады Калины [120].

2. Бытовая техника. Корпус холодильника изготавливают методом штамповки и сварки из листовой стали толщиной 0,6 – 1,0 мм, двери - 0,8 мм [121].

Толщина стенок корпуса системного блока компьютера обычно составляет 0,5 – 1,0 мм, что обеспечивает должный уровень защиты от внешнего воздействия и внутренних шумов [122].

3. Строительные материалы. Металлический сайдинг представляет собой профильные панели из стального оцинкованного листового проката толщиной 0,40 - 0,65 мм со специальным устойчивым к внешней среде декоративным многослойным покрытием, толщина которого составляет от 50 до 250 мкм [123]. Металлический сайдинг от компании Grand Line - панели, толщина которых составляет 0,45 или 0,5 мм. Толщина покрытия находится в пределах 25 – 200 мкм [27].

Металлочерепица изготавливается из тонколистовой стали толщиной от 0,35 до 0,7 мм. Крупные производители профилированных кровель (например, Металл Профиль или Grand Line) обычно используют сырье с толщиной от 0,4 до 0,5 мм, а качественное лакокрасочное и цинковое покрытие могут существенно увеличить общую толщину кровельного листа. Например, полиуретановое покрытие имеет величину от 30 до 50 мкм, что прибавляет 0,03 или 0,05 мм к общим показателям. Покрытие кровли пластизолом добавит к толщине основания до 200 мкм [124].

Металлопрофиль изготавливается из листа толщиной от 0,45 до 1,0 мм. От толщины применяемого материала зависит вес одного квадрата материала, его прочностные качества и стоимость [125]. Поэтому тенденция идет к уменьшению

толщины, которая достигает 0,3 – 0,5 мм [126].

Проведенный анализ выявил, что у автомобилей, бытовой техники, строительных материалов и аналогичных изделий и материалов толщина основания составляет от 0,3 до 1,5 мм. Значит достаточно много случаев, когда приходится измерять толщину покрытия, сопоставимую с толщиной поверхности, на которую нанесено данное покрытие.

Анализ эксплуатационной документации на магнитные толщиномеры показал, что 78 % из исследуемых толщиномеров указывают критическую толщину основания, которую можно измерять толщиномером с нормируемой погрешностью. Значение критической толщины у большинства толщиномеров составляет 0,5 мм. При этом толщина основания, которое входит в комплект толщиномера для проведения его калибровки, находится в пределах от 2 до 5 мм.

Следовательно, необходимо проведение экспериментальной проверки влияния толщины основания на погрешность магнитных толщиномеров.

#### **4.2.2 Экспериментальное исследование влияния толщины основания на погрешность измерения магнитными толщиномерами**

**Формирование основной статистической гипотезы.** Статистическая гипотеза – это некоторое предположение о свойствах явления, которое необходимо проверить. Статистические гипотезы выдвигаются, когда необходимо проверить, является ли наблюдаемое явление элементом случайности или результатом воздействия некоторых мероприятий [127].

На первом этапе формулируем статистическую гипотезу, заключающуюся в проверке влияния толщины основания (существенного фактора), на которое наносится покрытие, на погрешность измерения толщины покрытия магнитными толщиномерами.

На втором этапе выбираем статистический критерий, с помощью которого будет проверяться гипотеза. В качестве критерия принимаем фактическое

(расчетное) отношение Фишера, которое сравниваем с критическим значением. Если фактическое (расчетное) отношение Фишера больше критического, то фактор (толщина основания) существенно влияет на погрешность толщиномера и данные зависимы от фактора с вероятностью  $P = 0,95$ .

Экспериментальные исследования проводим на макете, моделирующем основания различной толщины. Для соблюдения чистоты эксперимента в качестве макета принята ступенчатая пластина (рисунок 4.5), толщина ступеней которой равна 5, 2,5, 1,5, 1,0, 0,7 и 0,5 мм. Верхняя граница толщины 5 мм примерно соответствует или больше толщины основания, прилагаемого в комплект большинства приборов. Нижняя граница 0,5 мм указывается в эксплуатационной документации толщиномеров, как наименьшая допустимая величина. То, что все ступени выполнены на одном образце, исключает влияние магнитных свойств основания на погрешность измерения.

В качестве мер толщины, моделирующих толщину покрытия, приняты меры толщиной 196, 325 и 520 мкм. Результаты экспериментальных исследований, приведенные выше в главе 3, показали, что погрешность всех исследуемых толщиномеров для этих мер не превышает допустимого значения, а значит исключается влияние толщины мер на проведение экспериментальных исследований на основаниях различной толщины.



Рисунок 4.5 – Образец оснований различной толщины

**Экспериментальные исследования толщиномера ТТ210.** Сначала экспериментальные исследования проводились при нулевой калибровке по

основанию толщиной 5 мм. По мере толщиной 196 мкм оценивалась погрешность толщиномера на каждом основании. Для этого было проведено пять опытов. В каждом опыте на каждом основании было проведено по пять измерений, результаты которых приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений толщины покрытий толщиномером ТТ210 на разных по толщине основаниях

№ опыта	№ измерения	Толщина меры 196 мкм					
		Толщина основания, мм					
		5	2,5	1,5	1	0,7	0,5
Опыт 1	1	196	191	197	209	223	249
	2	197	191	197	209	225	250
	3	196	192	196	210	226	250
	4	195	191	198	208	228	249
	5	196	192	199	209	224	252
Опыт 2	6	194	191	195	207	222	247
	7	194	192	194	205	221	247
	8	195	194	194	206	221	243
	9	194	190	194	206	222	249
	10	194	190	196	207	222	246
Опыт 3	11	196	190	198	208	224	246
	12	196	190	196	208	223	247
	13	195	191	196	207	226	246
	14	197	191	201	207	224	247
	15	198	192	197	208	223	248
Опыт 4	16	196	192	196	209	223	248
	17	196	190	195	209	224	247
	18	195	190	196	207	223	247
	19	195	191	197	209	225	248
	20	196	191	196	207	225	247
Опыт 5	21	195	189	195	208	223	247
	22	195	190	195	207	223	249
	23	194	191	196	206	225	247
	24	196	190	195	205	224	247
	25	195	190	194	206	226	245
Среднее арифметическое		195,44	190,88	196,12	207,48	223,8	247,52
Критерий 1 составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011		0,8434	0,7596	0,7412	0,8796	0,8090	0,7705
Критерий 2 составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011		2,6774	2,7174	4,2740	3,4101	4,3223	4,5926

**Проверку нормальности распределения результатов измерений** проводим по методике, приведенной выше в п. 3.2.2. с помощью составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011 [69]. Если значение составного критерия находится между квантилями распределения  $d_{q/2} = 0,8841$  и  $d_{1-q/2} = 0,7096$ , то для уровня значимости  $q_1 = 1\%$  и  $99\%$  результаты измерений в ряду считают распределенными нормально.

Результаты расчета составного критерия по ГОСТ Р 8.736-2011 [69] приведены в двух последних сроках таблицы 4.2. Видно, что все измерения по всем основаниям различной толщины подлежат закону нормального распределения.

**Проверку существенности влияния фактора (толщины основания)** на погрешность толщиномера проводим по методике, приведенной выше в п. 3.2.3. В качестве критерия принято фактическое (расчетное) отношение Фишера, которое сравниваем с критическим значением. Если фактическое (расчетное) отношение Фишера больше критического, то фактор (толщина основания) существенно влияет на погрешность толщиномера и данные зависимы от фактора с вероятностью  $P = 0,95$ .

Результаты расчета показывают, что фактическое (расчетное) отношение Фишера 1313,101 намного больше критического отношения Фишера, которое равно  $F_{0.05;6;29} = 2,013$ . Следовательно, толщина основания существенно влияет на погрешность толщиномера, а данные исследования являются актуальными.

Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разной толщине оснований по мере толщиной 196 мкм и нулевой калибровке по толстому основанию приведены на рисунке 4.6.

Из графиков видно, что при толщине основания 0,5, 0,7 и 1,0 мм погрешность прибора превышает допустимое значение.

Аналогичные результаты получены и при исследованиях на мерах толщины 325 и 520 мкм (рисунок 4.7)

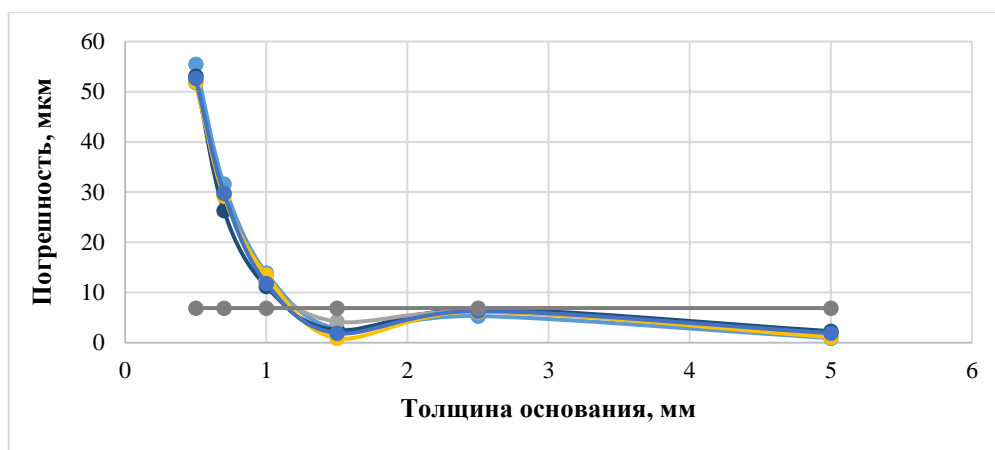


Рисунок 4.6 – Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разной толщине оснований по мере толщиной 196 мкм и нулевой калибровке по толстому основанию

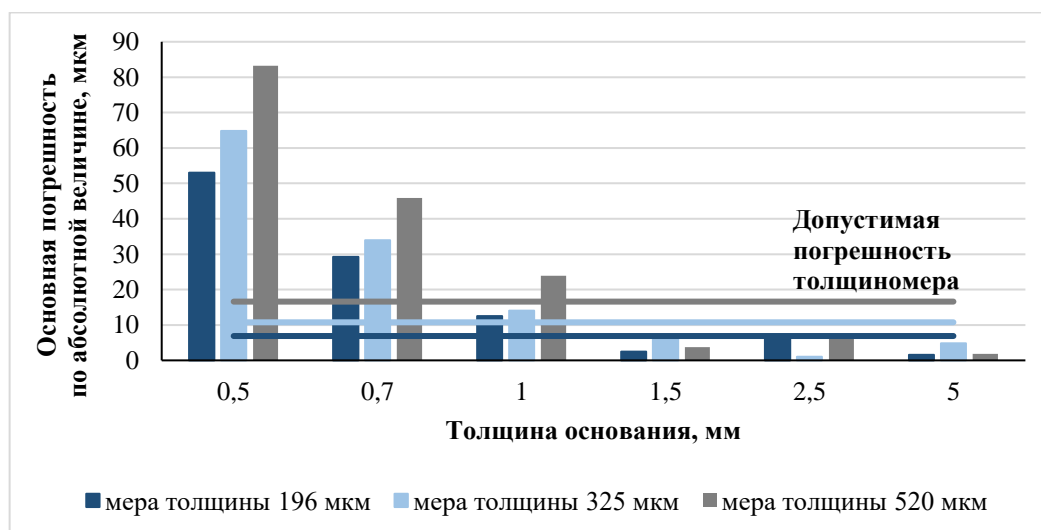


Рисунок 4.7 – Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разной толщине оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм

На следующем этапе были проведены аналогичные исследования погрешности толщиномера ТТ210 при разной толщине оснований. Отличие заключается в том, что нулевая калибровка проводилась по каждому основанию (рисунок 4.8).

В этом случае произошло существенное снижение погрешности толщиномера, особенно при тонких основаниях и во всех случаях основная погрешность толщиномера не превышала допустимых значений.



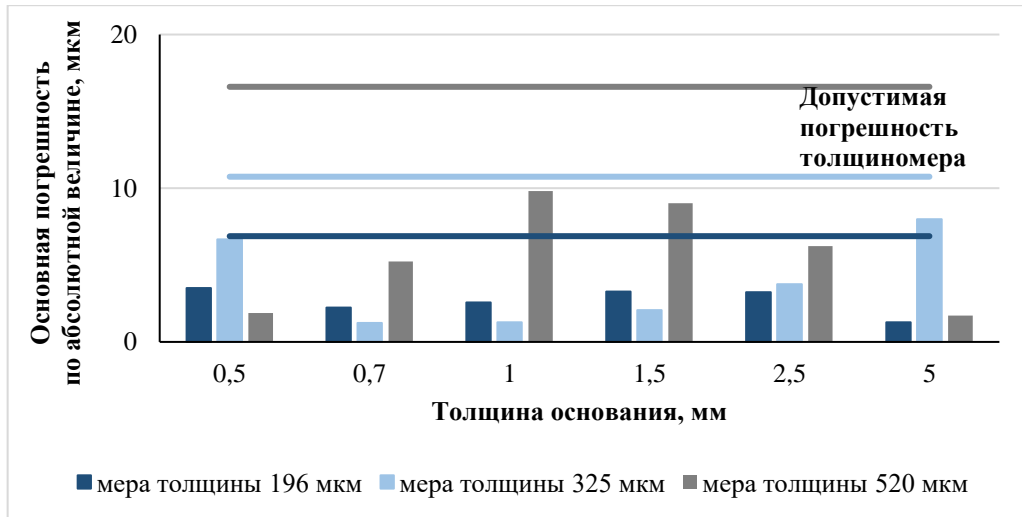


Рисунок 4.8 – Погрешность толщиномера ТТ210 при нулевой калибровке по каждому основанию

Аналогичные зависимости погрешности средства измерений от толщины основания получены и при исследовании толщиномеров ТТ220 (рисунок 4.9). Видно, что при толщине основания 0,5 и 0,7 мм погрешность толщиномера ТТ220 превышает допустимое значение.

В эксплуатационной документации на толщиномеры покрытий ТТ210 и ТТ220 указана критическая толщина основания, которая соответствует 0,5мм. Эксплуатировать данные толщиномеры при измерении толщины покрытия при малых толщинах основания можно только при условии, что калибровка прибора осуществляется по основанию такой же толщины.

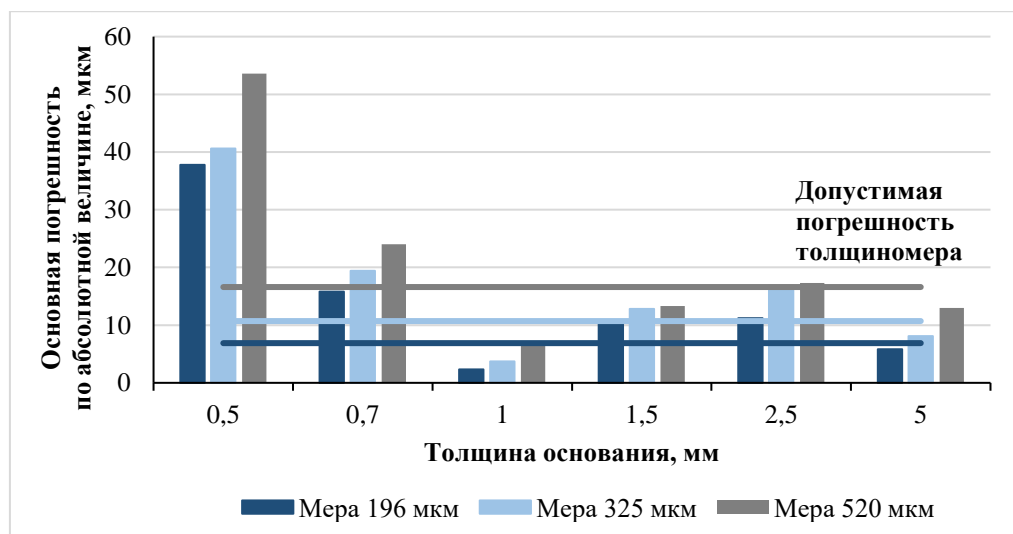


Рисунок 4.9 – Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ220 при разной толщине оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм

В комплект магнитных толщиномеров входят одна или несколько мер толщины покрытий и одно основание, по которому проводится калибровка прибора перед измерением толщины покрытия. 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.

### **4.3 Исследование влияния краевого эффекта на погрешность измерения магнитными толщиномерами**

#### **4.3.1 Анализ изделий и материалов, при измерении толщины покрытий которых может проявляться краевой эффект**

Краевой эффект измерения толщины покрытия – это явление искажения информативного параметра входного сигнала на краях покрытого участка или на участках изменения форм поверхности.

Измерения, проводимые слишком близко к кромке или с внутренней стороны углубления, не будут достоверными, если прибор не откалиброван специально для таких измерений. Краевой эффект может распространяться на расстояние до 20 мм от края образца в зависимости от прибора.

Сигнал датчика зависит от геометрии объекта, на котором происходит измерение толщины покрытия, так как датчик толщиномера представляет из себя открытую магнитную систему и магнитные силовые линии, которые распространяются на значительное расстояние от катушки. Если датчик расположить близко к краю объекта, нарушая требования допускаемой величины, указанной в паспорте на определенный тип датчика, то это приведет к значительной дополнительной погрешности.

В зависимости от устройства электромагнитной схемы датчика краевой

эффект проявляется в различной степени. Для уменьшения влияния краевого эффекта поверхность датчика, непосредственно контактирующего с покрытием, делают сферической или цилиндрической с малым радиусом.

Краевой эффект может проявляться при контроле толщины покрытия деталей относительно малого размера или при резких изменениях контура поверхности изделия (рисунок 4.9).



Рисунок 4.9 – Примеры краевого эффекта на деталях малого размера и на изгибах поверхностей бытовой техники

#### 4.3.2 Экспериментальное исследование влияния краевого эффекта на погрешность магнитных толщиномеров покрытий

Экспериментальные исследования проводим на образцах оснований диаметрами 5, 10, 15, 20 и 40 мм, моделирующих примеры краевого эффекта (рисунок 4.10). Все образцы оснований выполнены из одного материала, что исключает влияние магнитных свойств основания на погрешность измерения.



Рисунок 4.10 – Образцы оснований различных диаметров

В качестве мер толщины, моделирующих толщину покрытия, приняты меры толщиной 196, 325 и 520 мкм.

Первая часть экспериментальных исследований толщиномера ТТ210 проводилась при нулевой калибровке по основанию толщиной 5 мм. По мере толщиной 196 мкм оценивалась погрешность толщиномера на каждом основании диаметрами 5, 10, 15, 20, 40 мм. Для этого было проведено пять опытов. В каждом опыте на каждом основании было проведено по пять измерений, результаты которых приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерений толщины покрытий толщиномером ТТ210 на разных по диаметру основаниях

№ опыта	№ измерения	Толщина меры 196 мкм				
		Диаметр основания, мм				
		5	10	15	20	40
Опыт 1	1	393	262	220	201	186
	2	429	265	218	200	187
	3	403	266	218	201	186
	4	412	261	219	201	186
	5	403	265	217	201	187
Опыт 2	6	450	268	220	202	187
	7	487	265	219	201	187
	8	423	265	219	202	187
	9	394	260	217	201	186
	10	398	264	217	201	187
Опыт 3	11	399	269	218	201	187
	12	406	259	219	201	187
	13	409	261	217	202	186
	14	410	261	216	202	188
	15	417	263	217	201	187
Опыт 4	16	400	263	216	202	188
	17	410	261	217	202	187
	18	395	261	219	202	187
	19	389	264	216	201	187
	20	390	265	219	202	189
Опыт 5	21	394	266	219	202	187
	22	391	267	220	203	187
	23	392	262	217	202	187
	24	394	263	218	202	187
	25	390	262	218	202	188
Среднее арифметическое		407,12	263,52	218	201,52	187

Аналогично получены результаты измерений толщины покрытий толщиномером ТТ210 на разных по диаметру основаниях и при исследованиях на мерах толщины 325 и 520 мкм (рисунок 4.11).

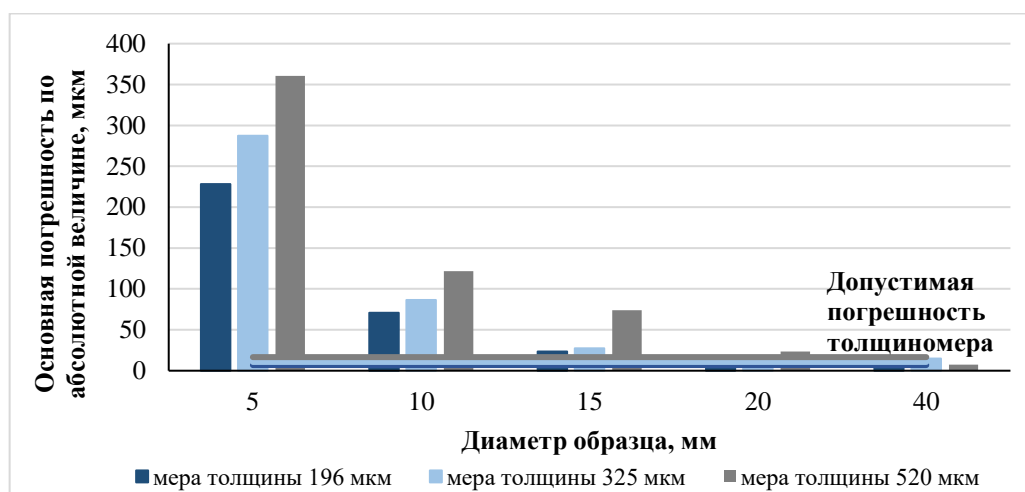


Рисунок 4.11 – Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм

Из диаграммы видно, что при диаметрах оснований 5, 10 и 15 мм погрешность прибора превышает допустимое значение. Кроме этого, установлено, что погрешность толщиномера ТТ210 превышает допустимую погрешность для оснований диаметрами 20 и 40 мм при исследованиях на мерах толщины 520 мкм и 196, 325 мкм соответственно.

На следующем этапе были проведены аналогичные исследования погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований при нулевой калибровке по основанию диаметром 40 мм (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Нулевая калибровка по основанию диаметром 40 мм

Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм при нулевой калибровке по

основанию диаметром 40 мм (рисунок 4.13) показывают неудовлетворительные результаты практически на всех образцах, за исключением основания диаметром 40 мм и мер толщины покрытия 196, 325 мкм.

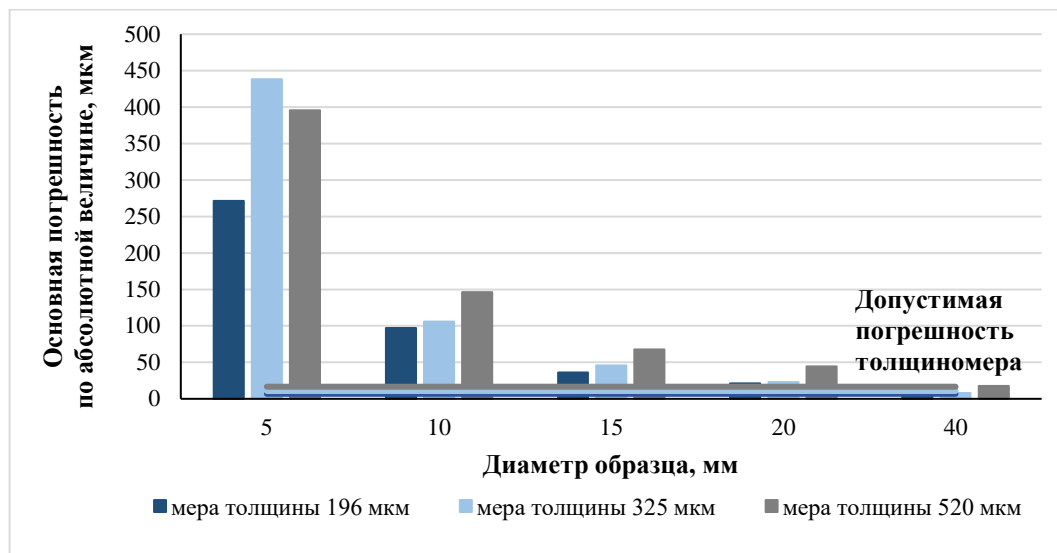


Рисунок 4.13 - Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований при нулевой калибровке по основанию диаметром 40 мм

Далее были проведены аналогичные исследования погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований при нулевой калибровке по каждому основанию (рисунок 4.14).

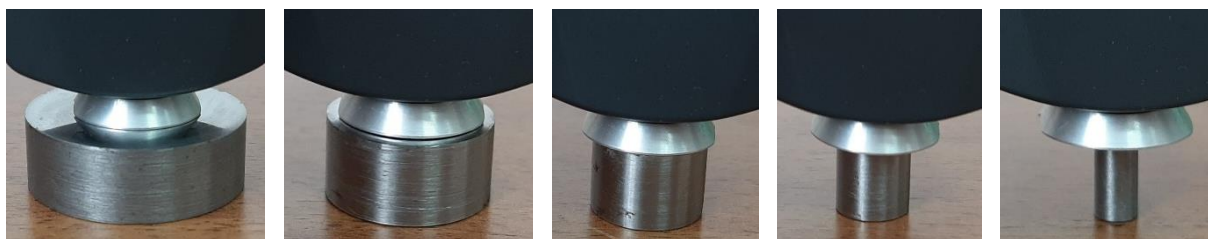


Рисунок 4.14 – Нулевая калибровка по каждому диаметру образца

В результате произошло существенное снижение погрешности толщиномера, но практически во всех случаях основная погрешность толщиномера превышает допустимые значения, за исключением основания диаметром 40 мм и мер толщины покрытия 196, 325 мкм (рисунок 4.15).

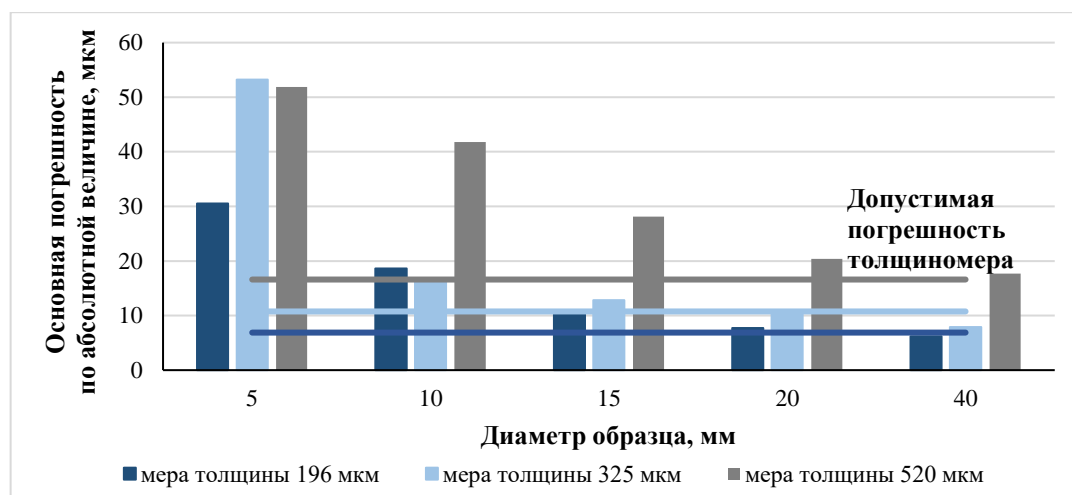


Рисунок 4.15 – Погрешность толщиномера ТТ210 при нулевой калибровке по каждому диаметру образца

Толщиномер ТТ220 в сравнении с моделью ТТ210 менее чувствителен к размеру области измерения покрытия (рисунок 4.16), которая для данных толщиномеров установлена в пределах 7 мм, но по допустимому значению погрешности не соответствует требованиям эксплуатационной документации.

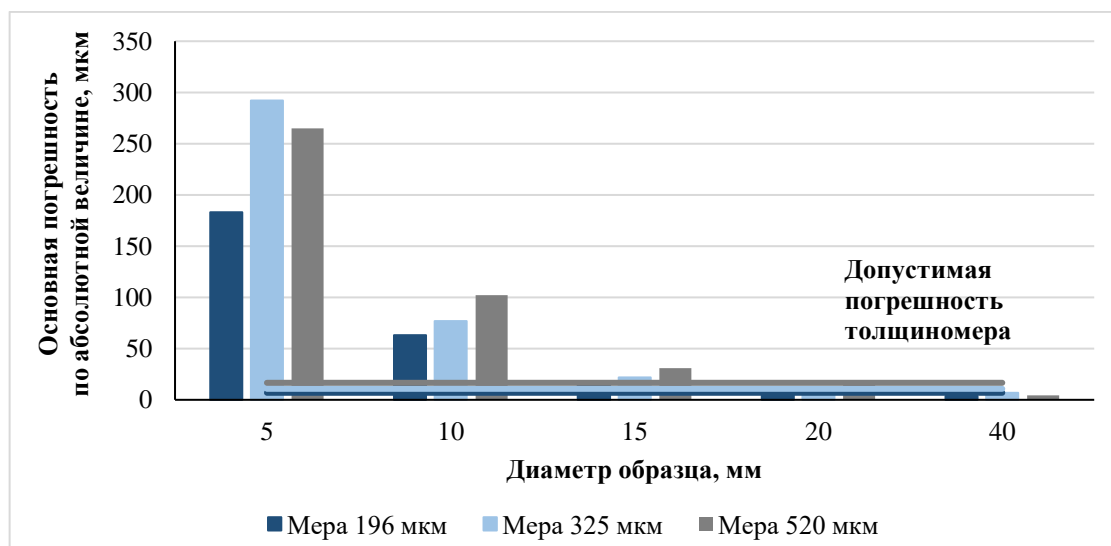


Рисунок 4.16 - Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ220 при разных диаметрах оснований

Значительно меньше погрешность показывает толщиномер ТТ210 при изменении расстояния от центра преобразователя толщиномера до края поверхности, на которой происходит измерение толщины покрытия (рисунок 4.17).

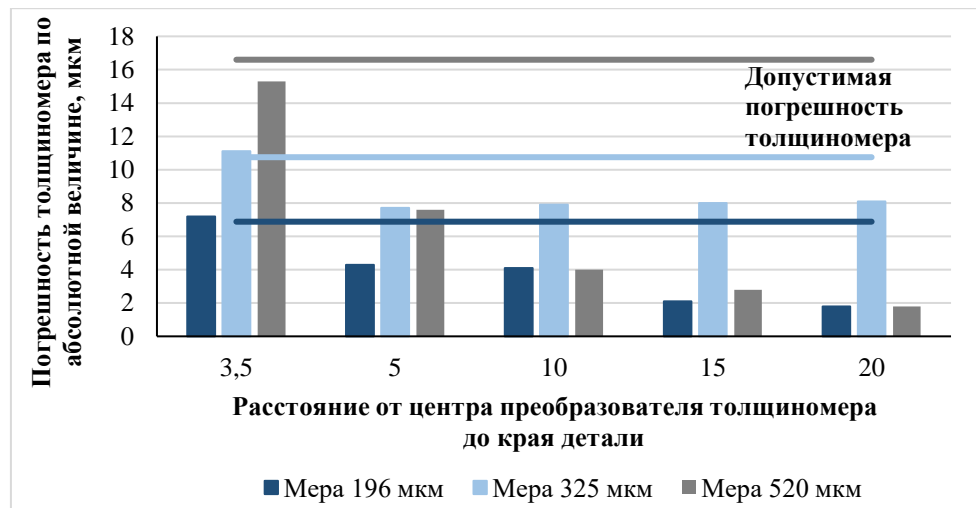


Рисунок 4.17 - Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных расстояниях от центра преобразователя толщиномера до края основания

Аналогичные зависимости наблюдаются и при исследовании толщиномера ТТ220.

#### 4.4 Исследование влияния радиуса кривизны детали на погрешность измерения магнитными толщиномерами

На точность измерения оказывает влияние и кривизна поверхности изделия, которая зависит в большой степени от модели и типа прибора, но всегда увеличивается с уменьшением радиуса кривизны.

Экспериментальные исследования проводим на образце, состоящем из оснований диаметрами 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мм, моделирующих примеры радиуса кривизны деталей (рисунок 4.16). Так как все основания различных диаметров выполнены на одном образце, то это исключает влияние магнитных свойств основания на погрешность измерения.

В качестве мер толщины, моделирующих толщину покрытия, приняты меры толщиной 196, 325 и 520 мкм.





Рисунок 4.16 – Образец из оснований различных диаметров

Экспериментальные исследования толщиномера ТТ210 проводились при нулевой калибровке по основанию толщиной 5 мм. По мере толщиной 196 мкм оценивалась погрешность толщиномера на каждом основании диаметрами 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мм. Для этого было проведено пять опытов. В каждом опыте на каждом основании было проведено по пять измерений, результаты которых приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты измерений толщины покрытий толщиномером ТТ210 на каждом основании диаметрами 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мм

№ опыта	№ измерения	Толщина меры 196 мкм						
		Диаметр основания, мм						
		10	15	20	30	50	70	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Опыт 1	1	242	224	213	209	197	196	195
	2	250	225	221	207	197	195	194
	3	246	225	224	204	204	201	195
	4	243	230	210	208	198	202	195
	5	240	228	227	205	198	196	196
Опыт 2	6	242	224	213	209	197	196	195
	7	250	225	221	207	197	195	194
	8	246	225	224	204	204	201	195
	9	243	230	210	208	198	202	195
	10	240	228	227	205	198	196	196

## Продолжение таблицы 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Опыт 3	11	242	224	213	209	197	196	195
	12	250	225	221	207	197	195	194
	13	246	225	224	204	204	201	195
	14	243	230	210	208	198	202	195
	15	240	228	227	205	198	196	196
Опыт 4	16	242	224	213	209	197	196	195
	17	250	225	221	207	197	195	194
	18	246	225	224	204	204	201	195
	19	243	230	210	208	198	202	195
	20	240	228	227	205	198	196	196
Опыт 5	21	242	224	213	209	197	196	195
	22	250	225	221	207	197	195	194
	23	246	225	224	204	204	201	195
	24	243	230	210	208	198	202	195
	25	240	228	227	205	198	196	196

Аналогично получены результаты измерений толщины покрытий толщиномером ТТ210 на разных по диаметру основаниях и при исследованиях на мерах толщины 325 и 520 мкм (рисунок 4.17).

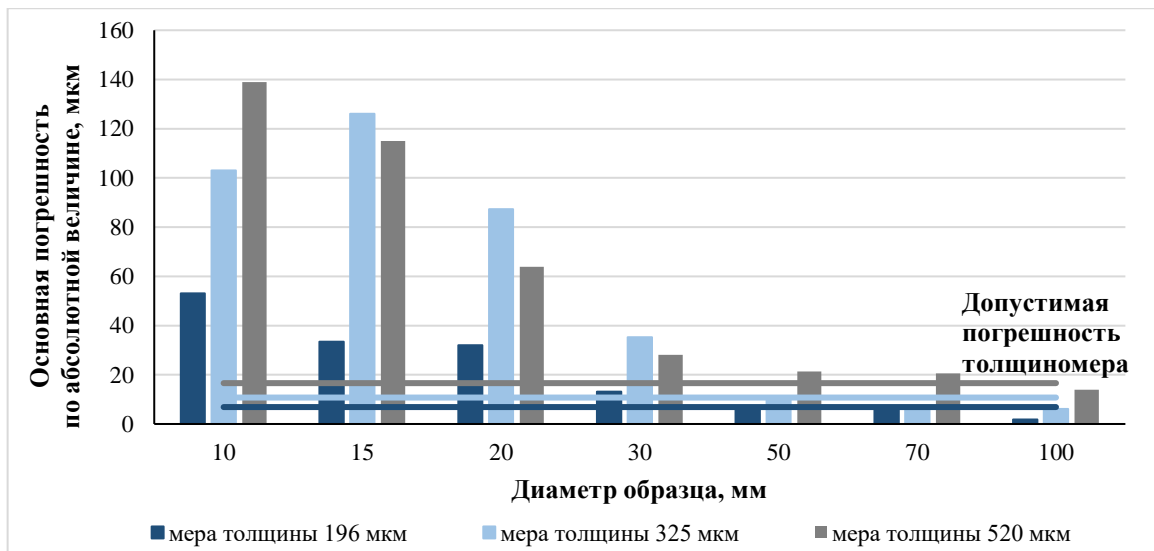


Рисунок 4.17 - Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований по мерам толщиной 196, 325 и 520 мкм

Результаты оценки погрешности толщиномера ТТ210 при разных диаметрах оснований показывают, что при диаметрах оснований 10, 15, 20, 30 мм

погрешность прибора превышает допустимое значение. Кроме этого, установлено, что погрешность толщиномера ТТ210 превышает допустимую погрешность для оснований диаметрами 50 и 70 мм при исследованиях на мерах толщины 520 мкм.

Большая погрешность толщиномера при измерении толщины покрытия на криволинейных поверхностях объясняется невозможностью в ручном режиме устанавливать толщиномер строго по радиусу поверхности.

Аналогичные результаты получены и при исследовании толщиномера ТТ220.

#### **4.5 Выводы по четвертой главе**

1. Анализ эксплуатационной документации на толщиномеры покрытий показал, что наименования и количество приведенных в ней технических характеристик, существенно отличаются от номенклатуры показателей качества продукции, регламентированной ГОСТ 4.177-85. Их количество в соотношении с количеством показателей качества, нормированных данным стандартом, колеблется от 27 до 59 процентов.

Отсутствие показателей безотказности, долговечности, ремонтпригодности в документации у части исследуемых толщиномеров существенно ограничивает возможности для сравнения приборов и обоснованного выбора потребителя и идет в разрез с ФЗ «О защите прав потребителей» в части статьи 8 «Право потребителя на информацию».

Для устранения данных несоответствий необходим национальный стандарт на общие технические условия магнитных толщиномеров.

2. Сравнительный анализ факторов, влияющих на точность толщиномеров, показал, что в технической документации на приборы указывается только часть факторов из рекомендованных ГОСТ 31993-2013. Следовательно, потребители данной продукции из-за отсутствия надлежащей информации могут приобрести толщиномер, не соответствующий их потребностям, а при измерении толщины покрытия получать результаты с заведомо большей погрешностью.

3. Установлено, что толщина основания, на которое нанесено покрытие, может существенно влиять на величину погрешности толщиномера, особенно если калибровка осуществляется по основанию, отличному от контролируемой поверхности. Исследования толщиномера ТТ210 показали, что при толщине основания 0,5, 0,7 и 1,0 мм погрешность прибора превышает допустимое значение.

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.

4. Исследование влияния на погрешность толщиномера ТТ210 краевого эффекта показало, что при контроле толщины покрытий у деталей, диаметр контролируемой поверхности которых менее 15 мм, следует выбирать толщиномеры с соответствующими характеристиками.

5. Исследование влияния на погрешность толщиномера ТТ210 кривизны поверхности изделия показало, что при диаметрах оснований 10, 15, 20, 30 мм погрешность прибора превышает допустимое значение. При больших диаметрах оснований погрешность будет зависеть от толщины измеряемого покрытия.

## 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 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. 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 9.008-2021 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76114/>.

2. Бабаджанов Л.С. Метрологическое обеспечение измерений толщины покрытий: теория и практика / Л.С. Бабаджанов, М.Л. Бабаджанова. - М.: ИПК Издво стандартов, 2004 (Калуж. тип. стандартов). - 263 с.: ил., табл.; 25 см.; ISBN 5-7050-0474-5 (в пер.).

3. ГОСТ 9.072-2017 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/65187/>.

4. ГОСТ 8.362-79 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерение толщины покрытий. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/40191/>.

5. Защитные покрытия: учеб. пособие / Лобанов М.Л., Кардолина Н.И., Россина Н.Г., Юровских А.С. - Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2014. - 200 с.; ISBN 978-5-7996-1101-9.

6. ГОСТ 9.301-86 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/12266/>.

7. ГОСТ 9.306-85 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Обозначения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/20321/>.

8. ГОСТ 9.302-88 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические неметаллические неорганические. Методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/19600/>.



9. ГОСТ 9.303-84 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования к выбору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29518/>.

10. ГОСТ 9.032-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3852/>.

11. ГОСТ 9.104-2018 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/69705/>.

12. ГОСТ 9.105-80 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Классификация и основные параметры методов окрашивания [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2967/>.

13. ГОСТ 9.402-2004 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2743/>.

14. ГОСТ 31993-2013 (ИСО 2808:97) Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрyтия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/54924/>.

15. ГОСТ 9.031-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия анодно-окисные полуфабрикатов из алюминия и его сплавов. Общие требования и методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005015>.

16. ГОСТ 9.304-87 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия газотермические. Общие требования и методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/28859/>.

17. ГОСТ 9.307-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия цинковые горячие. Общие требования и методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11145/>.

18. ГОСТ 9.315-91 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия алюминиевые горячие. Общие требования и методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/38461/>.

19. ГОСТ 9.406-84 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия органосиликатные. Технические требования и методы испытаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2122/>.

20. ГОСТ 9.410-88 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия порошковые полимерные. Типовые технологические процессы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1706/>.

21. Сясько В.А. Перспективные методы измерения толщины защитных покрытий. Проблемы методов и метрологического обеспечения / В. А. Сясько, С. С. Голубев, Н. И. Смирнова // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сборник статей 6-й Международной научно-технической конференции, Могилев, 19-20 сентября 2017г. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. - Могилев: Белорусско-Российский университет, 2017. - С. 30-39.

22. P50.2.006-2001 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений толщины покрытий в диапазоне 1–20000 мкм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200009148>.

23. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Вихретоковая толщинометрия неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов // Мир измерений, 2010, № 6, стр.18-23.

24. Сясько В.А. Методы и приборы измерения толщины гальванических покрытий. Вопросы применения и обеспечения достоверности // Гальванотехника и подготовка поверхности. 2011. №3. С. 42–52.

25. ГОСТ 9.407–2015 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/60182/>.

26. Таблица толщин лакокрасочного покрытия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://xn--e1afifeddsk6e.xn--p1ai/ThicknesTable.html>.

27. Металлосайдинг от компании Grand Line [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: <https://fasad-prosto.ru/sajding/metallicheskij/grand-line/metallosajding-ot-kompanii-grand-lajn.html>.

28. Характеристики полимерных покрытий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.euromet-s.ru/documents/metaltile/polimer\\_prokat/harakteristiki/](https://www.euromet-s.ru/documents/metaltile/polimer_prokat/harakteristiki/).

29. ГОСТ Р 51164-98 Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/9004/>.

30. ГОСТ 9.313-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические на пластмассах. Общие требования и технологические операции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/11384/>.

31. ГОСТ 25346-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/56936/>.

32. Sekatskii, V. S. Two-point calibration of coating thickness gauges: what needs to be considered to improve measurement accuracy/ V. S. Sekatskii, O. A. Gavrilova, N. V. Merzlikina, Yu. A. Pikalov, Ya. Yu. Pikalov, I. A. Kaposhko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering // the Workshop “Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering”, Krasnoyarsk, 04-06 April's, – 2019. – № 537.

33. Гелашвили Н. В., Муджири Я. Н., Бабаджанов Л. С. Роль толщинометрии покрытий в экономии материальных ресурсов // Измерительная техника. — 1982. — № 12. – С. 35-37.

34. Шестопалова Л.П. Материаловедение: лакокрасочные материалы и покрытия транспортных средств на их основе: учебно-методическое пособие / Л.П. Шестопалова. // М.: МАДИ, 2018. – 92 с.

35. Гаврилова О.А. Сравнительный анализ толщины покрытий и диапазона измерений магнитными и токовихревыми толщиномерами / О.А. Гаврилова, М.И.

Соболева, В.С. Секацкий // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов 5-й Международной молодежной научно-практической конференции (14 ноября 2018 года)/ редкол.: Павлов Е.В. (отв. ред.); в 2-х томах, Т.1., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 164 – 168.

36. Sekatsky V. S. Analysis of regulatory documentation for thickness of coatings of materials and products // V. S. Sekatsky, O. A. Gavrilova, N. V. Merzlikina, Y. A. Pikalov, I. A. Kaposhko // Conference Series: Journal of Physics. — 2020. — Т. 1515 (№ 5). — С. 052025.

37. ГОСТ Р 316-2006 Национальный стандарт Российской Федерации. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия термодиффузионные цинковые. Общие требования и методы контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2651/>.

38. ГОСТ Р ИСО 5725-1 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/2995/>.

39. Правила по межгосударственной стандартизации ПМГ 96-2009 ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200079072>.

40. Рекомендации по метрологии МИ 1317-2004 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200044373>.

41. ГОСТ Р 8.820-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрологическое обеспечение. Основные положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/55975/>.

42. Глушкова О.Г., Медовикова Н.Я., Рейх Н.Н.. Метрологическое обеспечение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://quality.eup.ru/METROL/mo.htm>.

43. ГОСТ Р 56542-2019 Контроль неразрушающий. Классификация видов и

методов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/72183/>.

44. Наумчик И.В. Неразрушающий контроль толщины покрытий / И.В. Наумчик, А.В. Шевченко, К.В. Алексеев. // *Фундаментальные исследования*, № 12, 2015. С. 935-939.

45. Сясько В. А. Электромагнитные методы и приборы контроля и мониторинга толщины покрытий и стенок изделий: дис. ... доктора технических наук: 05.11.13 / Сясько Владимир Александрович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. - Санкт-Петербург, 2013. - 359 с.: ил.

46. Ковенский И. М. Металловедение покрытий: Учеб. для студентов вузов, обучающихся по специальности «Материаловедение в машиностроении» / И. М. Ковенский, В. В. Поветкин. - М.: СП Интермет инжиниринг, 1999. - 296 с.: ил.; 21 см.; ISBN 5-89594-023-4.

47. Валитов А. М., Шилов Г. И. Приборы и методы контроля толщины покрытий: Справочное пособие. – Л.: Изд-во «Машиностроение», 1970. 120 с.

48. Толщиномер ТМ-20МГ4. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.fundmetrology.ru/10\\_tipy\\_si/11/7list.aspx](http://www.fundmetrology.ru/10_tipy_si/11/7list.aspx).

49. Толщиномер ТТ220. Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.fundmetrology.ru/10\\_tipy\\_si/11/7list.aspx](http://www.fundmetrology.ru/10_tipy_si/11/7list.aspx).

50. Рейтинг толщиномеров. Интернет магазин «Все о толщиномерах» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vsetolshinomeri.ru/dlya-pokupatelej/rejting-tolshhinomerov-2015.html>.

51. ГОСТ 8.417-2002 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/8435/>.

52. МИ 1903-97 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны толщины покрытий. Методика поверки [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293795/4293795124.htm> .

53. Баташев К. П., Макаренко Н. В. Методика приготовления эталонов толщины гальванических осадков: В кн. «Трубы ЛПИ». – 1957. – С. 232–238.

54. Богуславский М. Г., Шарова Е. Е. Образцы для градуировки и поверки радиоизотопных толщиномеров // Измерительная техника. - 1965. – № 9. – С. 6-7.

55. Бабаджанов Л. С., Лубсон А. И., Каландадзе Г. Г., Надирашвили И. А. Меры толщины диэлектрических покрытий // Измерительная техника. – 1991. – №11 – С. 25-26.

56. Меры толщины покрытий для магнитных толщиномеров; Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. // Измерительная техника. 1999, №6, с.33.

57. Комбинированный набор мер толщины покрытий для магнитных толщиномеров; Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. // Измерительная техника, №12, 2001, с.30.

58. Меры толщины тонких покрытий и их измерение методом совмещения профилограмм, Бабаджанов Л. С., Бабаджанова М. Л. // Измерительная техника , №4, 2003, с.10.

59. Лаанеотс Р. А. Методы и средства для поверки толщиномеров покрытий. Таллин. техн. ун-т. - Таллинн: Валгус, 1989. - 159,[1] с.: ил.; 20 см.; ISBN 5-440-00377-0 .

60. Бабаджанова М.Л. Разработка и исследование мер толщины покрытий для поверки магнитных толщиномеров: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.11.15 / Бабаджанова Марианна Леоновна; [Место защиты: Всерос. научно-исслед. ин-т метрологич. службы]. - Москва, 2007. - 26 с.

61. Федеральный [закон РФ от 07.02.1992 N 2300-1 \(ред. от 31.07.2020\) «О защите прав потребителей»](#). Официальный сайт компании «КонсультантПлюс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_305/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_305/).

62. Федеральный закон РФ от 26.06.2008 N 102-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об

обеспечении единства измерений». Официальный сайт компании «КонсультантПлюс». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_77904/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/).

63. ГОСТ 8.502-84 ГСИ. Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29548/>.

64. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115154>.

65. ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3190>.

66. ГОСТ Р 8.674-2009 ГСИ. Общие требования к средствам измерений и техническим системам и устройствам с измерительными функциями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/50246/>.

67. Соболева М.И. Факторы, влияющие на точность измерений толщины покрытий магнитными толщиномерами / Соболева М.И., Гаврилова А.А., Секацкий В.С. // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование: сборник научных трудов Международной молодежной научно-практической конференции в 3-х томах, Т.3., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2017. С. 49 – 53.

68. Sekatskii, V.S. Analysis of Techniques for Verification of Coating Thickness Gauges/ Sekatskii, V.S., Gavrilova, O.A., Merzlikina, N.V., Morgun, V.N.// Measurement Techniques (2019), 62(9) pp. 762-768.

69. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/52042>.

70. Потапов А.И., Сясько В.А. Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий. /Научное, методическое, справочное пособие.

[Книга]. - СПб: Гуманистика, 2009. - 904 с.

71. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Методы и средства измерения толщины металлических покрытий [Статья] // Мир гальваники. - 2011 г. - №5. - стр. 29-32.

72. Утвержденные типы средств измерений. Официальный сайт Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4>.

73. Толщиномер CARSYS DPM-816 PRO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tolshchinomery.ru/tolshhinomer-carsys-dpm-816-pro> .

74. Сясько В. А. Электромагнитные методы и приборы контроля и мониторинга толщины покрытий и стенок изделий: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.11.13 / Сясько Владимир Александрович; [Место защиты: Нац. минерально-сырьевой ун-т «Горный»]. - Санкт-Петербург, 2013. - 40 с.

75. Михеев М.Н., Горкунов Э.С. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля. [Книга]. - М: Наука, 1993. 252 с.

76. Неразрушающий контроль. Магнитные методы контроля / Справочник / ред. чл.-корр. РАН Ключев В. В.. - М: Машиностроение, 2003 г.. - в 7-ми томах. - Т. 6, Книга 1. 358 с.

77. Щербинин В.Е., Горкунов Э.С. Магнитный контроль качества металлов [Книга]. - Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 264 с.

78. Дорофеев А.Л. и др. Индукционная толщинометрия [Книга]. - М: Энергия, 1978. 184 с.

79. Измерения. Контроль. Качество. Неразрушающий контроль. [Книга]. - М: Издательство стандартов, 2002. 709 с.

80. Коррозия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Коррозия>.

81. Сясько В.А., Ивкин А.Е. Обеспечение достоверности результатов измерений толщины металлических покрытий магнитными и вихретоковыми методами в условиях машиностроительных производств [Статья] // Метрология. - 2011 г. - №2. - стр. 3 - 12.



82. ГОСТ 25347-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/56937/>.

83. Глухов В.И. Система допусков линейных размеров максимума материала и их контроль калибрами / В. И. Глухов, В. А. Гриневич, В. В. Шалай // Динамика систем, механизмов и машин. 2018. Том 6. № 2. С. 12 – 16.

84. Мерзликина Н.В. Взаимозаменяемость и нормирование точности / Н.В. Мерзликина, В.С. Секацкий, В.А. Титов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 192 с.

85. ГОСТ 24643 – 81 Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/39589/>.

86. ГОСТ Р 53442-2015 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Установление геометрических допусков. Допуски формы, ориентации, месторасположения и биения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/60536/>.

87. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1419>.

88. Никифоров А.Д. Метрология, стандартизация и сертификация: Учеб. Пособие / А.Д. Никифоров, Т.А. Бакиев. – 2-е изд. Испр. – М.: Высш. Шк., 2003. – 422 с.

89. Анухин В.И. Допуски и посадки. Учебное пособие. 3-е изд. / В.И. Анухин – СПб.: Питер, 2005. – 207 с.

90. Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и сертификация, 2012 [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://studme.org/16350122/tovarovedenie/edinye\\_printsiipy\\_postroeniya\\_sistem\\_dopuskov\\_posadok](https://studme.org/16350122/tovarovedenie/edinye_printsiipy_postroeniya_sistem_dopuskov_posadok).

91. Система показателей качества продукции [Электронный ресурс] – Режим

доступа: <https://studfiles.net/preview/5274565>.

92. Система показателей качества продукции [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://standartgost.ru/0/2873-sistema\\_pokazateley\\_kachestva\\_produktsii?page=1](https://standartgost.ru/0/2873-sistema_pokazateley_kachestva_produktsii?page=1).

93. ГОСТ 4.177-85 Система показателей качества продукции. Приборы неразрушающего контроля качества материалов и изделий. Номенклатура показателей [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/20489/>.

94. Секацкий В.С. Сравнение показателей качества с техническими характеристиками толщиномеров покрытий / В. С. Секацкий, Н.В. Мерзликина, В.Н. Моргун // Международный научно-исследовательский журнал.. 2017. № 2 – 3 (56). С.132-135.

95. ГОСТ Р 8.973-2019 Государственная система обеспечения единства измерений. Национальные стандарты на методики поверки. Общие требования к содержанию и оформлению [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/72192/>.

96. РМГ 51-2002. ГСИ. Документы на методики поверки средств измерений. Основные положения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200030928>.

97. ГОСТ 18061-90 Толщиномеры радиоизотопные. Общие технические условия [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/10616/>.

98. МИ 187-86. ГСИ. Средства измерений. Критерии достоверности и параметры методик поверки. – Введ. 1987–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 11 с.

99. Федеральный закон от 29.06.2015 N 162-ФЗ (ред. от 30.12.2020) «О стандартизации в Российской Федерации» [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_181810/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_181810/).

100. ГОСТ Р 1.16 – 2011 Стандартизация в Российской Федерации.

Стандарты национальные предварительные. Правила разработки, утверждения, применения и отмены [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/51533/>.

101. ГОСТ 1.5-2001 Межгосударственная система стандартизации. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/6320/>.

102. ГОСТ Р 56510-2015 Метрологическое обеспечение в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200122218>.

103. ГОСТ Р 8.631-2007 ГСИ. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки. – Введ. 2008–02–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.

104. ГОСТ Р 8.671-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Приборы активного контроля линейных параметров. Методика поверки. – Введ. 2011–07–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 8 с.

105. ГОСТ 166-89 Штангенциркули [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200012675>.

106. ГОСТ 577-68 Индикаторы часового типа с ценой деления 0,01 мм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200004105>.

107. ГОСТ 6507-90 Микрометры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200023923>.

108. ГОСТ 8.051-81 Государственная система обеспечения единства измерений. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200003821>.

109. ГОСТ Р 55878-2013 Спирт этиловый технический гидролизный ректификованный. Технические условия [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://docs.cntd.ru/document/1200108004>.

110. ГОСТ Р 8.563-2009 ГСИ. Методики (методы) измерений [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200077909>.

111. Юдин, Ю.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Ю.В. Юдин, М.В. Майсурадзе, Ф.В. Водолазский. - Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018.— 124 с.

112. Powell, M. J. D. Approximation Theory and Methods, Cambridge University Press, 1981.

113. Atkinson, Kendall A. An Introduction to Numerical Analysis (2nd ed.), John Wiley and Sons, 1988.

114. Schatzman, Michelle, Numerical Analysis: A Mathematical Introduction, Oxford: Clarendon Press, 2002.

115. Митин И. В., Русаков В. С. Анализ и обработка экспериментальных данных : [Учеб.-метод. пособие для студентов мл. курсов] / И. В. Митин, В. С. Русаков; Физ. фак. МГУ им. М. В. Ломоносова. - М.: Физ. фак. МГУ, 2002. - 44 с.; 21 см.; ISBN 5-8279-0022-2.

116. Д. Ю. Руди, М. В. Попова, С. И. Грубая погрешность и критерии их исключения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40261/1/eksie\\_2016\\_49.pdf](https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/40261/1/eksie_2016_49.pdf).

117. Математическая статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://function-x.ru/statistics\\_dispersion\\_analysis.html](https://function-x.ru/statistics_dispersion_analysis.html).

118. Устройство кузова легкового автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://studbooks.net/2381457/tehnika/osnovnaya\\_chast](http://studbooks.net/2381457/tehnika/osnovnaya_chast).

119. Алдошин М. Кузов из крылатого металла / Михаил Алдошин // Журнал "Кузов" №50. Июнь - июль 2015. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.kuzov-media.ru/articles/kuzov\\_iz\\_krylatogo\\_metalla.html](http://www.kuzov-media.ru/articles/kuzov_iz_krylatogo_metalla.html).

120. Толщина металла кузова моделей ваз [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://autopost74.ru/obzori/толщина-металла-кузова-моделей-ваз.html>.

121. Устройство холодильников [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

[http://www.masterholod.ru/holod\\_ustr.php](http://www.masterholod.ru/holod_ustr.php).

122. Как выбрать корпус для компьютера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://myblaze.ru/vyibiraem-sistemnyiy-blok-korpUSA-dlya-kompyutera>.

123. Металлосайдинг (металлический сайдинг) – производители, характеристики и свойства панели, размеры, цвета и виды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://moydomik.net/materialy/oblicovochnye/196-metallosiding-razmery-cveta-vidy.html>.

124. Толщина металлочерепицы: показатели стали, цинка и покрытия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://krovportal.ru/krovlya/metallocherepica/tolschina-metallocherepitsy>.

125. Как подобрать вид и размер металлопрофиля для строительства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://krovlya.guru/krovlya/kak-podobrat-vid-i-razmer-metalloprofilya-dlya-stroitelstva.html>.

126. Семь советов как выбрать металлопрофиль [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://металлопрофиль.kiev.ua/stati/22-7-sovetov-kak-vybrat-metalloprofil>.

127. Математическая статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://function-x.ru/statistics\\_dispersion\\_analysis.html](https://function-x.ru/statistics_dispersion_analysis.html).

128. 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.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А****(обязательное)****Методика определения допусков на толщину покрытий**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе

ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»

Р.А. Барышев

«*Barishev*» 2023 г.**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСКОВ  
НА ТОЛЩИНУ ПОКРЫТИЙ**

Разработал:

*Gavrilova*

Гаврилова О.А.

(ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»)

Рассмотрено и рекомендовано к внедрению:

Протокол заседания

№ 5 от 01.02 2023 г.

Заведующий кафедрой СМиУК

*Grigoryeva* О.А. Григорьева

**Содержание**

A1 Область применения.....	160
A2 Нормативные ссылки.....	160
A3 Термины и определения.....	161
A4 Схема расположения поля допуска на толщину покрытия.....	162
A5 Порядок определения допусков на толщину покрытия.....	162
A6 Определение интервала номинальных размеров толщины покрытий...	163
A7 Установление уровней относительной точности.....	164
A8 Определение стандартного допуска на толщину покрытий .....	165
A9 Определение предельных размеров толщины покрытия.....	166

## **A1 Область применения**

Настоящая методика устанавливает порядок выбора допусков на толщину металлических и неметаллических неорганических покрытий по ГОСТ 9.301-86, лакокрасочных покрытий по ГОСТ 9.032-74.

Основные положения методики можно использовать и для других видов покрытий (газотермических, гальванических и других).

В методике изложены основные положения и терминология, относящиеся к системе допусков на толщину покрытий, и приведены интервалы номинальных размеров толщины покрытий, степени точности и значения допусков.

## **A2 Нормативные ссылки**

В настоящей методике использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 9.008-73 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения

ГОСТ 9.032-74 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения

ГОСТ 9.301-86 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования

ГОСТ 25346-2013 Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки

### **Примечание**

При пользовании настоящей методикой целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на территории государства по соответствующему указателю стандартов и классификаторов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если



ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящей методикой следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

### **А3 Термины и определения**

В настоящей методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

**А3.1 покрытие:** Слой или несколько слоев материала, искусственно полученных на покрываемой поверхности.

**А3.2 основание:** Объект, находящийся под покрытием или служащий для получения на нем покрытия.

**А3.3 толщина покрытия:** Расстояние по нормали между поверхностью основания и поверхностью внешнего слоя покрытия.

**А3.4 номинальный размер толщины покрытия:** Размер толщины покрытия идеальной формы, определенной чертежом.

**А3.5 действительный размер толщины покрытия:** Размер толщины покрытия, полученный в результате измерения с допускаемой погрешностью.

**А3.6 предельные размеры толщины покрытия:** Предельно допустимые размеры толщины покрытия.

**А3.7 верхний предельный размер толщины покрытия:** Наибольший допустимый размер толщины покрытия.

**А3.8 нижний предельный размер толщины покрытия:** Наименьший допустимый размер толщины покрытия.

**А3.9 допуск:** Разность между верхним и нижним предельными размерами.

**А3.10 стандартный допуск:** Допуск, установленный системой допусков на толщину покрытий.

#### **A4 Схема расположения поля допуска на толщину покрытия**

Схема расположения поля допуска на толщину покрытия приведена на рисунке А1. За номинальное значение толщины покрытия принимается ее минимальная величина, которая указывается в технической документации и при обозначении покрытия. Поле допуска на толщину покрытия расположено относительно номинального размера односторонне в плюс.

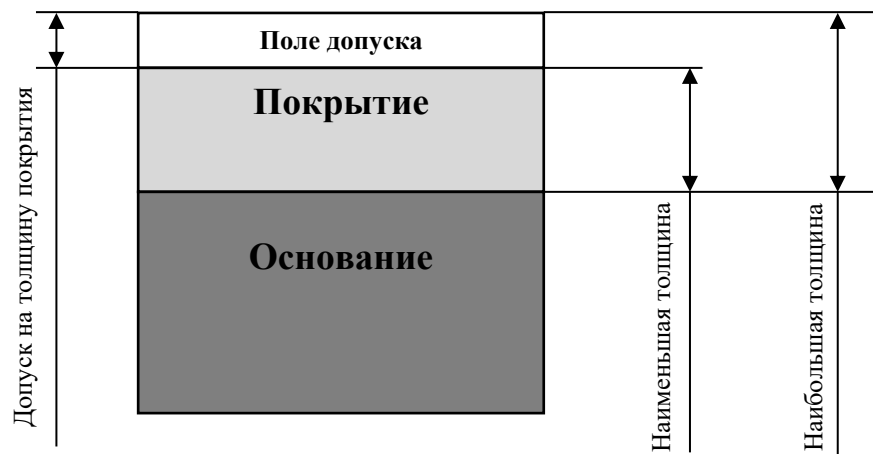


Рисунок А1 – Схема расположения поля допуска на толщину покрытия

#### **A5 Порядок определения допусков на толщину покрытия**

Общий порядок определения допусков на толщину покрытия представлен на рисунке А2.



Рисунок А2 – Порядок определения допусков на толщину покрытия

## **А6 Определение интервала номинальных размеров толщины покрытий**

А6.1 Нормируемый диапазон толщины покрытий установлен от 0,1 до 10000 мкм. Под нормируемым диапазоном толщины покрытия понимаются те значения толщины, на которые установлены допуски.

А6.2 Для построения интервалов номинальных размеров толщины покрытий принят ряд предпочтительных чисел R5.

А6.3 Значения интервалов номинальных размеров толщины покрытий приведены в таблице А1.

Таблица А1 – Значения интервалов номинальных размеров толщины покрытий

Интервалы номинальных размеров толщины покрытий, мкм	Интервалы номинальных размеров толщины покрытий, мкм	Интервалы номинальных размеров толщины покрытий, мкм	Интервалы номинальных размеров толщины покрытий, мкм
До 1			
Свыше 1 до 1,6	Свыше 10 до 16	Свыше 100 до 160	Свыше 1000 до 1600
Свыше 1,6 до 2,5	Свыше 16 до 25	Свыше 160 до 250	Свыше 1600 до 2500
Свыше 2,5 до 4,0	Свыше 25 до 40	Свыше 250 до 400	Свыше 2500 до 4000
Свыше 4,0 до 6,0	Свыше 40 до 60	Свыше 400 до 600	Свыше 4000 до 6000
Свыше 6,0 до 10	Свыше 60 до 100	Свыше 600 до 1000	Свыше 6000 до 10000

А6.4 Из условного обозначения покрытия, указанного в технической документации на изделие, определить минимальное значение толщины покрытия.

А6.5 По таблице А1 определить интервал номинальных размеров толщины покрытия.

## **А7 Установление уровней относительной точности**

А7.1 Уровень относительной точности характеризуется степенью точности.

А7.2 Установлено пять степеней точности: с первой по пятую.

А7.3 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%, для пятой – 60 %.

А7.4 Для расчета величины допуска для каждой степени точности установлено количество единиц допуска *a*. Значения количества единиц допуска приведены в таблице А2.

Таблица А2 – Количество единиц допуска

Степень точности	1	2	3	4	5
Количество единиц допуска $a$	0,1	0,16	0,25	0,4	0,6

А7.5 В зависимости от эксплуатационных требований к покрытию и технологических возможностей выбрать степень точности.

### **А8 Определение стандартного допуска на толщину покрытий**

А8.1 Значения допусков  $T$  определяются на пересечении интервалов номинальных размеров толщины покрытий и степени точности, и рассчитываются по формуле:

$$T = a i,$$

где  $T$  - значение допуска;

$a$  – количество единиц допуска;

$i$  – единица допуска.

Значения допусков на толщину покрытий округлены до ближайших значений  $a$ , которые приведены в таблице А2.

Единица допуска  $i$  определяется как среднеарифметическое из крайних значений интервалов номинальных размеров толщины покрытий, приведенных в таблице А1.

А8.2 Расчетное значение допуска округляется до ближайшего значения из ряда предпочтительных чисел R10.

А8.3 Значения допусков на толщину покрытий приведены в таблице А3.

А8.4 В зависимости от выбранного интервала номинальных размеров толщины покрытия и степени точности, по таблице А3 выбрать значение допуска на толщину покрытий.

А8.5 Значения допусков для размеров толщины покрытий менее 1 мкм допускается корректировать как в меньшую сторону, так и в большую сторону, исходя из производственной необходимости и технологических возможностей.

Таблица А3 – Допуски на толщину покрытий

Интервалы номинальных значений толщины покрытий, мкм	Степени точности				
	1	2	3	4	5
	Допуск на толщину покрытия, мкм				
До 1	0,06	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

А8.6 Числовые значения допусков толщины покрытий, не предусмотренные настоящими рекомендациями, являются специальными. Допускается применять их, если они предусмотрены в других стандартах для соответствующих видов продукции.

### **А9 Определение предельных размеров толщины покрытия**

А9.1 Положение допуска относительно номинального размера располагается от нуля в плюс.

А9.2 Определить нижний и верхний предельные размеры толщины покрытия. Нижний предельный размер толщины покрытия равен номинальному размеру. Верхний предельный размер толщины покрытия больше номинального размера на величину допуска.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б****(обязательное)****Акт внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы****ПРЕДТВЕРЖДАЮ**

Проректор по учебной работе  
 ФГОУ ВО «Сибирский  
 федеральный университет»

\_\_\_\_\_ Д.С. Гуц

22 » 12 2022 г.

**АКТ**

**внедрения в учебный процесс Политехнического института  
 результатов диссертационной работы Гавриловой О.А. на тему  
 «Совершенствование метрологического обеспечения контроля толщины  
 покрытий магнитными толщиномерами»**

Результаты диссертационной работы Гавриловой О.А. внедрены в учебный процесс Политехнического института СФУ на кафедре «Стандартизация, метрология и управление качеством» (СМиУК) и используются при проведении практических занятий по следующим дисциплинам: «Методы и средства измерений и контроля», «Основы испытаний продукции», «Взаимозаменяемость и нормирование точности», «Современные проблемы стандартизации и метрологии», «Метрологическое обеспечение производства, контроля и испытаний».

Методическая и экспериментальная работы позволили повысить уровень подготовки бакалавров и магистров по осуществляемым направлениям подготовки, усовершенствовать исследовательскую часть при проведении практических занятий.

Заведующий кафедрой СМиУК

О.А. Григорьева

**ПРИЛОЖЕНИЕ В****(обязательное)****Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы  
в АО «НПП «Радиосвязь»»**

УТВЕРЖДАЮ  
Технический директор  
АО «НПП «Радиосвязь»»  
 Е.В. Богатырев  
« 12 » 12 2022 г.

**АКТ****внедрения результатов научно-исследовательской работы**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы сотрудника ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Гавриловой Оксаны Алексеевны на тему «Совершенствование элементов метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами» использованы на АО «НПП «Радиосвязь»» при контроле толщины покрытий магнитными толщиномерами и при поверке магнитных толщиномеров.

Предложенная Гавриловой О.А. методика по созданию системы допусков позволила системно нормировать точность толщины покрытий в нормативной документации, осуществлять выбор толщиномеров по точности и проводить двусторонний контроль толщины покрытий.

Предложенные Гавриловой О.А. изменения и дополнения в методику поверки толщиномеров покрытий обеспечили получение необходимой, полной и достоверной измерительной информации с заданными свойствами.

Главный метролог АО «НПП «Радиосвязь»»



И.А. Рыжков



**ПРИЛОЖЕНИЕ Г****(обязательное)****Методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров**

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»  
Р.А. Барышев  
«*Bar*» 2023 г.

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
МАГНИТНЫХ ТОЛЩИНОМЕРОВ**

Разработал:

Гаврилова О.А.

(ФГАОУ ВО «Сибирский  
федеральный университет»)

Рассмотрено и рекомендовано к внедрению:

Протокол заседания

№ 5 от 01.02 2023 г.

Заведующий кафедрой СМиУК

  
О.А. Григорьева

**Содержание**

Г1 Область применения.....	171
Г2 Нормативные ссылки.....	171
Г3 Термины и определения.....	172
Г4 Основные положения.....	173
Г5 Проверка сведений об измеряемой величине в эксплуатационной документации.....	175
Г6 Проверка информации о соответствии диапазона измерений и погрешности толщиномера покрытий.....	175
Г7 Проверка мер толщины покрытий, входящих в комплект толщиномера.....	176
Г8 Проверка погрешности толщиномера покрытий в интервале влияющих величин.....	177

## **Г1 Область применения**

Г1.1 Настоящий документ «Методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров» (далее – методика) устанавливает основные положения и процессы, позволяющие оценивать и/или корректировать метрологические характеристики магнитных толщиномеров на стадии их проектирования, изготовления, испытания типа средств измерений, поверки (калибровки) и эксплуатации.

Г1.2 На стадии проектирования магнитных толщиномеров в технических условиях и эксплуатационной документации должны указываться нормированные метрологические характеристики, которые обеспечат достоверность измерительной информации во всем диапазоне измерений с учетом основных влияющих величин (ГОСТ 31993-2013).

Г1.3 На стадии изготовления, испытания типа средств измерений, поверки (калибровки) магнитных толщиномеров должны быть обеспечены и подтверждены основные метрологические характеристики, указанные в технической документации.

Г1.4 На стадии эксплуатации должна быть возможность осуществлять корректировку метрологических характеристик толщиномеров, указанных в технической документации, в случае выявления несоответствий

## **Г2 Нормативные ссылки**

В настоящей методике использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 31993-2013 Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия

ГОСТ 8.009-84 Государственная система обеспечения единства измерений. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений

ГОСТ 9.008-73 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Термины и определения

#### Примечание

При пользовании настоящей методикой целесообразно проверить действие ссылочных стандартов и классификаторов на территории государства по соответствующему указателю стандартов и классификаторов, составленному по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный документ заменен (изменен), то при пользовании настоящей методикой следует руководствоваться замененным (измененным) стандартом. Если ссылочный документ отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

### Г3 Термины и определения

В настоящей методике применены следующие термины с соответствующими определениями:

**Г3.1 покрытие:** Слой или несколько слоев материала, искусственно полученных на покрываемой поверхности.

**Г3.2 основание:** Объект, находящийся под покрытием или служащий для получения на нем покрытия.

**Г3.3 толщина покрытия:** Расстояние по нормали между поверхностью основания и поверхностью внешнего слоя покрытия.

**Г3.4 номинальный размер толщины покрытия:** Размер толщины покрытия идеальной формы, определенной чертежом.

Остальные термины и определения приведены в ГОСТ 9.008-73.

## Г4 Основные положения

Г4.1 В эксплуатационной документации на магнитные толщиномеры указываются основные метрологические характеристики. К ним относятся (ГОСТ 8.009-84):

- вид измеряемой величины. Измеряемой величиной является толщина покрытий, метод и средство измерения которой зависит от сочетания материалов покрытия и основания;

- диапазон измерений. В технической документации указывают нижнюю и верхнюю границы диапазона измерений;

- значение меры. В комплект толщиномера, как правило, входят мера (или меры) толщины покрытий и основание, с помощью которых осуществляется калибровка прибора в процессе эксплуатации;

- цена деления шкалы или цена единицы наименьшего разряда кода средств измерений, предназначенных для выдачи результатов в цифровом коде;

- погрешность толщиномера покрытий;

- погрешность толщиномера покрытий в интервале влияющих величин (толщины основания, краевого эффекта, радиуса кривизны основания и т.п.).

Г4.2 Основной метрологической характеристикой, влияющей на достоверность результата измерения толщины покрытий, является нормированная погрешность толщиномера покрытий, указанная в эксплуатационной документации.

Г4.3 Действительная погрешность магнитных толщиномеров зависит от номинальных размеров толщины измеряемого покрытия, от номинальных размеров мер толщины покрытий, от толщины основания, на которое нанесено покрытие, от краевого эффекта и т.п.

Г4.4 Настоящая методика (рисунок Г1) направлена на защиту прав потребителя в части получения достоверности информации, которая приведена в эксплуатационной документации на магнитные толщиномеры.

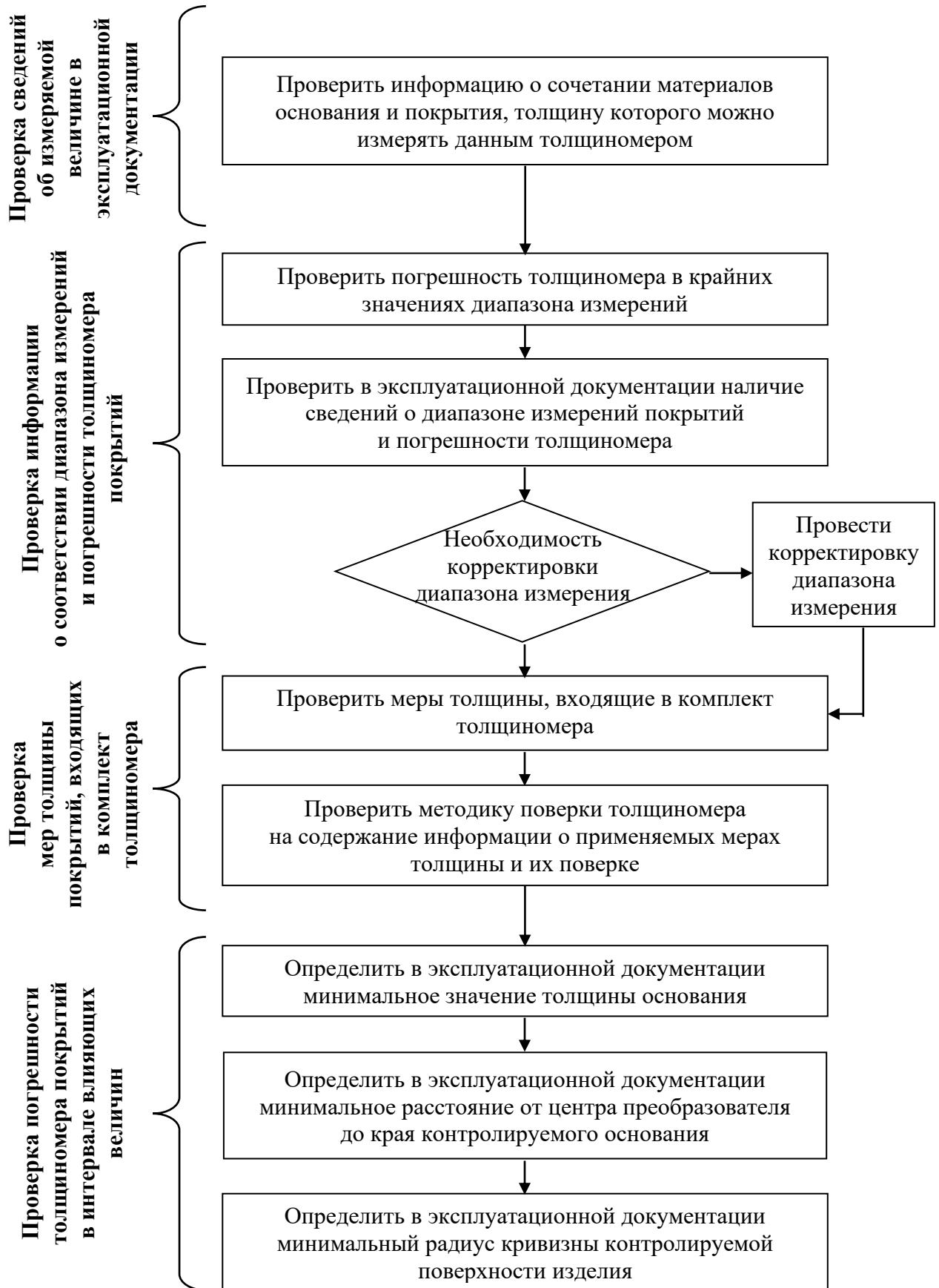


Рисунок Г1 – Порядок оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров

## **Г5 Проверка сведений об измеряемой величине в эксплуатационной документации**

В руководстве по эксплуатации и паспорте на магнитный толщиномер проверить информацию о сочетании материалов основания и покрытия, толщину которого можно измерять данным толщиномером.

## **Г6 Проверка информации о соответствии диапазона измерений и погрешности толщиномера покрытий**

Г6.1 Проверить в эксплуатационной документации наличие сведений о диапазоне измерений покрытий и погрешности толщиномера.

Например, в эксплуатационной документации толщиномера ТМ-20МГ4 указано, что диапазон измерений толщины покрытий составляет от 0 до 2000 мкм с погрешностью  $\pm(3+0,03h)$ , где  $h$  – номинальное значение измеряемой толщины покрытия.

Г6.2 Провести анализ на возможность обеспечения погрешности толщиномера в заявленном диапазоне. Для этого проверить погрешность толщиномера в крайних значениях диапазона измерений.

Например, для толщиномера ТМ-20МГ4 погрешность прибора при измерении толщины покрытий близких к нулю составит  $\pm 3$  мкм, а при 2000 мкм –  $\pm 63$  мкм. Следовательно, погрешность толщиномера в нижнем диапазоне измерения задана некорректно.

Г6.3 При необходимости провести корректировку диапазона измерений, в котором обеспечивается нормированная погрешность толщиномера. Корректировку можно проводить двумя способами: экспериментальным и/или расчетным.

Г6.4 При экспериментальном методе оценивается погрешность толщиномера по мерам толщины во всем нормируемом диапазоне.

Например, для толщиномера ТМ-20МГ4 экспериментально установлен диапазон измерений от 100 до 2000 мкм, в котором погрешность толщиномера не превышает допустимое значение. При этом проводился эксперимент в идеальных условиях, т.е. не учитывались толщина основания, кромочный эффект и др. влияющие факторы.

Г6.5 При расчетном методе принимается, что погрешность толщиномера не превышает четверти от допустимой толщины покрытия, которая в свою очередь равна четверти от номинального значения толщины покрытия.

Например, для толщиномера ТМ-20МГ4 выражение для определения наименьшего значения диапазона измерений будет иметь вид:

$$(3+0,03h) = 0,0625h.$$

Отсюда минимальное значение диапазона измерения толщиномером ТМ-20МГ4 должно быть больше  $h = 92$  мкм.

## **Г7 Проверка мер толщины покрытий, входящих в комплект толщиномера**

Г7.1 Проверить меры толщины покрытий, входящие в комплект толщиномера. Номинальные значения мер толщины должны охватывать весь диапазон измерений (как крайние, так и промежуточные значения).

Г7.2 Проверить содержание методики поверки. В ней должно быть указано, что:

- определение основной погрешности толщиномера должно осуществляться по мерам со значениями, близкими к крайним значениям поддиапазона, и которые равномерно распределены по шкале нормированного диапазона (поддиапазона);
- поверке подлежат меры толщины, входящие в комплект толщиномера.



## **Г8 Проверка погрешности толщиномера покрытий в интервале влияющих величин**

Г8.1 Данная проверка проводится в зависимости от условий эксплуатации толщиномера при доминировании влияющих величин (толщины основания, краевого эффекта, радиуса кривизны основания).

Г8.2 При измерении толщины покрытий на разных по толщине основаниях необходимо в эксплуатационной документации уточнить минимальное значение толщины основания, при котором сохраняется нормированная погрешность толщиномера.

Если толщина основания, входящего в комплект толщиномера, отличается от толщины основания, на котором требуется измерять толщину покрытия, необходимо оценить погрешность толщиномера по основанию, толщина которого близка к измеряемому.

При проектировании толщиномера покрытий необходимо предусмотреть комплект оснований разной толщины. Наименьшая толщина из комплекта должна соответствовать наименьшей нормируемой толщине.

Г8.3 При измерении толщины покрытий на малогабаритных деталях или близко к краю измеряемой поверхности необходимо в эксплуатационной документации проверить сведения, определяющие допустимый краевой эффект (минимальный диаметр области измерения или расстояние от центра преобразователя до края основания).

При отсутствии сведений, их необходимо определить экспериментально.

Г8.4 При измерении толщины покрытий на криволинейных поверхностях в эксплуатационной документации необходимо определить минимальный радиус кривизны, при котором погрешность толщиномера не должна превышать допустимого значения.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д****(обязательное)****Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы  
в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии  
и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва»**

УТВЕРЖДАЮ

И. о. директора

ФБУ «Государственный

региональный Центр

стандартизации, метрологии

и испытаний в Красноярском

крае, Республике Хакасия

и Республике Тыва»

В.Ф. Гарифуллин

2023 г.

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ****результатов научно-исследовательской работы**

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы на тему «Совершенствование метрологического обеспечения контроля толщины покрытий магнитными толщиномерами» выполненной Гавриловой Оксаной Алексеевной, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» использованы в ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва» при поверке магнитных толщиномеров, предназначенных для контроля толщины немагнитных покрытий на магнитных основаниях.

Предложенные Гавриловой О.А. изменения и дополнения в методику поверки толщиномеров покрытий, учитывающие в отличие от известных методик поверки случайную составляющую основной погрешности, позволяют обеспечить достоверность измерительной информации.

Разработанная Гавриловой О.А. методика оценки метрологических характеристик магнитных толщиномеров обеспечила снижение погрешности измерения, в том числе и в интервале основных влияющих величин.

Главный метролог

А.В. Самонин