

Анализ методик поверки толщиномеров покрытий

В.С. Секацкий, О.А. Гаврилова, Н.В. Мерзликina, В.Н. Моргун

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

Аннотация

Показана актуальность поверки средств измерений в системе обеспечения единства измерений. Проведен анализ структуры и содержания методик поверки конкретных толщиномеров покрытий, приведенных в эксплуатационной документации и в национальном стандарте. Показаны различия в методиках и их влияние на результаты поверки. Для повышения достоверности результатов поверки толщиномеров покрытий предложены рекомендации для включения их в содержание методики поверки.

Ключевые слова: толщиномеры покрытий, поверка, методики, анализ.

Analysis of methods for checking coating thickness gauges

Victor S. Sekatsky, Oksana A. Gavrilova, Natalya V. Merzlikina, Vasily N. Morgun

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstrakt

The relevance of checking of measuring instruments in the system of ensuring unity of measurements is shown. The analysis of structure and the maintenance of techniques of checking of concrete feeler gages of the coverings given in operational documentation and in the national standard is carried out. Differences in techniques and their influence on results of checking are shown. For increase in reliability of results of checking of feeler gages of coverings recommendations for their inclusion in the maintenance of a technique of checking are offered.

Keywords: feeler gages of coverings, checking, techniques, analysis.

Одним из элементов обеспечения единства измерений является поверка средств измерений, положительное решение которой должно гарантировать то, что поверенное средство измерения находится в нормированном точностном диапазоне метрологических характеристик и пригодно для дальнейшей эксплуатации. В сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, которую устанавливает Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» [1], должна проводиться обязательная поверка средств измерений. Она распространяется на средства измерения до ввода в эксплуатацию или после ремонта (первичная поверка), или находящиеся в эксплуатации (периодическая поверка). Средства измерений, не предназначенные для применения в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, могут подвергаться поверке в добровольном порядке.

Значимость поверки определяется и тем, что ее могут осуществлять только аккредитованные в национальной системе аккредитации лаборатории (юридические лица и индивидуальные предприниматели). Организация и проведение поверки регламентированы документом «Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке», утвержденным приказом Минпромторга РФ от 02.07.2015 г. № 1815 [2].

Виды работ, выполняемые при поверке каждого типа средств измерений, определяются методикой поверки, которая представляется при утверждении типа средств измерений [2]. Национальный стандарт, устанавливающий основные требования к построению и содержанию методик поверки средств измерений отсутствует (хотя аналогичные стандарты имеются, например, на методики калибровки средств измерений установлен ГОСТ Р 8.879-2014 [3]). Поэтому для отдельных

средств измерений разработаны национальные (межгосударственные) стандарты под конкретный тип. Например, ГОСТ Р 8.631-2007 устанавливает методику поверки электронных растровых измерительных микроскопов [4], ГОСТ Р 8.671-2009 – методику поверки приборов активного контроля линейных параметров [5], ГОСТ 8.502-84 – методику поверки толщиномеров покрытий [6] и т. п.

Рассмотрим методики поверки толщиномеров покрытий, которые являются объектом 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 двадцать миллиметров и в пятой точке в центре). Далее вычисляется среднее арифметическое значение толщины $X_{и}$ каждой измеренной меры по формуле:

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

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 ΔX каждой измеренной меры определяют по формуле:

$$\Delta X = X_{и} - X_N, \quad (2)$$

где X_N – 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_{bam} , который регламентирует наибольшую вероятность ошибочного признания годным любого в действительности дефектного экземпляра толщиномера [7].

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

$$\Delta_i = h_i - h_{oi}, \quad (3)$$

где h_i – i -тое значение толщины покрытия, измеренное толщиномером; h_{oi} – i -тое действительное значение толщины меры.

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

Совершенно другой подход к поверке толщиномеров изложен в **ГОСТ 8.502-84 «Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки»** [6]. Данная методика предусматривает выбор трех мер в каждом диапазоне измерения и на каждой мере проводить 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

$$\tilde{\Delta}_c = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \Delta_i, \quad (4)$$

где $\Delta_i = h_n - h_i$,

h_n – номинальное значение толщины меры; h_i – показания поверяемого толщиномера при i -том наблюдении (измеренные значения толщины покрытия).

Следует отметить, что в этом случае от номинального значения вычитается действительное. На самом деле всегда при определении отклонения [8] или погрешности [9] от действительного (искомого) вычитается номинальное (базовое) значение. Это влияет на знак рассчитываемой величины.

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

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\sum_{i=1}^5 (\Delta_i - \Delta_c)^2}. \quad (5)$$

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 [9]) вместо среднего квадратичного отклонения σ группы, содержащей n результатов измерений, необходимо использовать среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) σ_x .

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

Кроме того, запись под корнем в формуле (5) некорректна, т.к. в ней указаны отклонения от номинального размера, а не от среднего арифметического значения.

Основная погрешность равна $\Delta = \tilde{\Delta}_c + \overset{\circ}{\Delta}$. Но если взять случай, когда систематическая погрешность имеет отрицательное значение, а случайная составляющая – положительное, то основная погрешность может стремиться к нулю. Но это же не так. Некорректность данного выражения заключается в том, что случайная составляющая погрешности может быть как со знаком «плюс», так и со знаком «минус».

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

1. Систематическую погрешность следует определять по формуле:

$$\Delta_c = \tilde{h}_c - h_n, \quad (6)$$

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

2. При определении случайной погрешности необходимо использовать среднее квадратичное отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) σ_x .

Тогда случайная погрешность равна

$$\overset{\circ}{\Delta} = t \sigma_x, \quad (7)$$

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:

$$\Delta = \tilde{\Delta}_c \pm \overset{\circ}{\Delta}. \quad (8)$$

Сравним рассматриваемые методики поверки: методику МП 002.Д4-14; методику МП 159-261-2016; методику по ГОСТ 8.502-84 и методику по ГОСТ 8.502-84 с указанными предложениями. Примем толщину меры 200 мкм, предел допускаемой погрешности ± 6 мкм (см.

методику МП 159-261-2016). Измеренные при поверке значения толщины покрытия равны: 202, 193, 200, 202, 199 мкм. Результаты расчета основной погрешности сведем в табл. 1.

Таблица 1

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		
				ΔX	Δ_i	Δ_i	$\overset{\circ}{\Delta}$	Δ	h_i
h_1	202	$\Delta X = X_{II} - X_{II}$	+2	-2	$t = 2,78$ $\sigma = 3,7$	-	202	$t = 2,78$ $\sigma = 1,6$	-
h_2	193		-7	+7		-	193		-
h_3	200		0	0		-	200		-
h_4	202		+2	-2		-	202		-
h_5	199		-1	+1		-	199		-
Σ	996	-	-	4	-	-	996	-	-
Ср. ариф.	199,2	-	-	0,8	-	-	199,2	-	-
Погр., мкм	-	-0,8	-7	$\tilde{\Delta}_c = +0,8$	$\overset{\circ}{\Delta} = 10,3$	$\Delta = 11,1$	$\tilde{\Delta}_c = -0,8$	$\overset{\circ}{\Delta} = \pm 4,4$	$\Delta = -5,2$
Заключение по калибровке		Соответствует	Не соответствует	Не соответствует		Соответствует			

Результаты расчета представлены на рис. 1.

Расчеты показывают (см. табл. 1), что 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.

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 бракованные.

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 [9]), чего нет в первых двух методиках.

ГОСТ 8.502-84 [6] учитывает случайную составляющую, однако при обработке результатов измерений данная погрешность получается существенно завышенной (см. рис. 1). Это приведет к тому, что годные толщиномеры покрытий в процессе поверки будут признаны бракованными. Выше приведены рекомендации, как этого избежать.

Поверку толщиномеров покрытий, как правило, осуществляют по мерам толщины, которые устанавливаются на основание, входящее в комплект прибора. При первом знакомстве с толщиномерами покрытий бросается в глаза то, что основания, входящие в комплект прибора, у разных толщиномеров имеют разные размеры. Возможно, что это связано с ограничительными возможностями толщиномеров, такими как толщина основания и расстояние от центра преобразователя до края основания.

Для экспериментальной поверки влияния толщины основания на результаты поверки возьмем толщиномер мод. ТМ-20МГ4, который предназначен для измерения толщины покрытий в диапазоне от 0 мм до 2 мм и рекомендован к применению в машиностроении, металлургии, автомобилестроении и строительстве. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения толщины покрытия составляют $\pm(0,03h+0,003)$ мм, где h – значение толщины покрытия. Ограничительные условия:

- толщина ферромагнитного основания должна быть не менее 0,4 мм;
- расстояние от центра преобразователя до края ферромагнитного основания должно быть не менее 24,5 мм (диаметр 49 мм или квадрат 50x50 мм).

В комплекте толщиномера представлены меры толщины покрытия и основание толщиной 13 мм и диаметром 50 мм. Кроме этого при экспериментальных исследованиях использовалось основание толщиной 1 мм и диаметром 50 мм. Обработка результатов измерений осуществлялась по методике КБСП.427634.051 МП, прилагаемой к толщиномеру, где абсолютную погрешность измерения толщины покрытий рассчитывают по формуле (2), и по предложенной выше методике с учетом случайных составляющих (8). На первом этапе проведена оценка погрешности толщиномера мод. ТМ-20МГ4 на основании толщиной 13 мм и диаметром 50 мм, которое входит в комплект прибора и предназначено как для поверки толщиномера, так и для его калибровки в процессе эксплуатации. При этом использовались 10 эталонов толщины покрытий в пределах диапазона измерений. Результаты оценки погрешности представлены на рис. 2, столбчатая диаграмма на котором отражает допустимую погрешность прибора.

Значения погрешности оценивались по предложенной выше методике с учетом случайных составляющих (8) (ломаная линия с

точками) и по методике, прилагаемой к документации прибора (ломаная линия с квадратами). Анализируя данные, приведенные на рис. 2, можно заключить:

– погрешности прибора, рассчитанные по методике, прилагаемой к прибору, меньше погрешностей, рассчитанных по прилагаемой методике. Расхождение может достигать до двух раз из-за наличия случайных погрешностей;

– на первых трех эталонах обе методики расчета показали превышение допустимой погрешности прибора $\pm(0,03h+0,003)$ мм. Следовательно, по поверке данного прибора необходимо либо выносить отрицательное заключение, либо изменить диапазон измерения, который по эксплуатационной документации составляет от нуля до двух миллиметров. Да и как измерить нулевую толщину? [10];

– на всех остальных эталонах реальная погрешность не превышает допустимых значений. Кроме того, в диапазоне толщины покрытия от 250 до 1000 мкм наблюдается снижение погрешности из-за того, что систематическая составляющая погрешности переходит в отрицательную область и затем снова возвращается к положительным значениям. Этот момент можно использовать для повышения точности измерения в нормированном диапазоне.

На втором этапе исследования оценили погрешность толщиномера при его нулевой калибровке по основаниям различной толщины. Как было указано выше, в комплекте прибора имеется основание толщиной 13 мм. По этому основанию проводится поверка прибора и его калибровка перед проведением измерений. Толщину покрытия в данном случае имитировали эталонами покрытий.

Сначала оценили погрешность толщиномера при нулевой калибровке по основанию толщиной 13 мм и измерению эталонов на этом же основании. Результаты расчета погрешности представлены

столбцами без заливки на рис. 3. Видно, что погрешность по всем эталонам толщины находится в пределах допустимой (допустимая погрешность представлена абсолютными значениями и показана темно-серым цветом на рис. 3).

Затем нулевую калибровку провели на этом же основании толщиной 13 мм, а измерение толщины эталонов покрытий провели на основании толщиной 1 мм. Такое часто встречается на практике, когда нулевая калибровка осуществляется по прилагаемому к прибору основанию, а измерение толщины покрытия осуществляется на реальной поверхности, толщина которой может на порядок отличаться от толщины эталона (толщина кузова легкового автомобиля, толщина металлосайдинга и др.). Эксперименты показали (столбцы со светлой заливкой на рис. 3), что погрешность прибора по всем эталонам толщины существенно превышает допустимые значения. В этом случае годные значения толщины покрытия будут признаны дефектными.

Столбцы с темной заливкой на рис. 3 показывают значение погрешностей толщиномера при измерении толщины эталонов покрытий на основании толщиной 1 мм при предварительной нулевой калибровке по этому же основанию. Видно, что все погрешности находятся в пределах допуска. В эксплуатационной документации некоторых толщиномеров можно встретить запись, что нулевую калибровку желательно проводить по основанию проверяемой поверхности. Но возникает вопрос, где в ремонтной мастерской взять образец двери автомобиля да еще и без покрытия? Поэтому вытекает закономерный вывод, что толщиномеры покрытий необходимо поставлять по аналогии с эталонами толщины, с основаниями, толщина которых варьируется в пределах измерения прибором. Эта же информация должна отражаться и в методиках поверки толщиномеров покрытий.

По результатам проведенных исследований можно заключить:

1. В настоящее время при проведении поверки толщиномеров покрытий используют методики поверки, разработанные и утвержденные для каждой модели (или группы моделей). Адаптация методики поверки под конкретную модель конечно же учитывает особенности прибора. Однако с точки зрения обеспечения единства измерений все методики обязаны обеспечить достоверность результатов поверки, что не присутствует в рассмотренных выше методиках.

2. Действующий на момент подготовки данных материалов национальный стандарт (ГОСТ 8.502-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки) требует переработки, как в части определения систематической погрешности, так и в части случайной погрешности.

3. В эксплуатационной документации на толщиномеры покрытий должен быть указан реальный диапазон измерения, а методика поверки должна обеспечить его достоверность.

4. Для проведения калибровки при измерении потребителем толщины покрытий рекомендуется в комплект прибора включать основания различной толщины (комплект оснований), что позволит повысить точность измерений на деталях различной толщины.

Литература

1. Об обеспечении единства измерений [Электронный ресурс]: федер. закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ (ред. от 13.07.2015). // Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.

2. Порядок проведения поверки средств измерений, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке [Электронный ресурс]: Приказ Минпромторга РФ от 02.07.2015г. № 1815. //

Справочная правовая система «КонсультантПлюс». – Режим доступа: <http://www.consultant.ru>.

3. ГОСТ Р 8.879-2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Методики калибровки средств измерений. Общие требования к содержанию и изложению. – Введ. 2015–09–01. – М.: Стандартинформ, 2015. – 6 с.

4. ГОСТ Р 8.631-2007. Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки. – Введ. 2008–02–01. – М.: Стандартинформ, 2011. – 12 с.

5. 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.

6. ГОСТ 8.502-84 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Толщиномеры покрытий. Методы и средства поверки. – Введ. 1985–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 13 с.

7. МИ 187-86. ГСИ. Средства измерений. Критерии достоверности и параметры методик поверки. – Введ. 1987–07–01. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 11 с.

8. ГОСТ 25346-2013. Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – Введ. 2015–07–01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 37 с.

9. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Введ. 2013–01–01. – М.: Стандартинформ, 2013. – 18 с.

10. 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; в 2-х томах, Т.1., Юго-Зап. гос. ун-т., Курск: Из-во ЗАО «Университетская книга», 2018. С. 164 – 168.

Дата принятия

Подрисуночные подписи

Рис.1. Абсолютное значение погрешностей толщиномеров, определенных по разным методикам поверки

Рис. 2. Оценка погрешности толщиномера по разным методикам

Рис. 3. Оценка погрешности толщиномера при калибровке его по разным основаниям

Секацкий Виктор Степанович, кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», заведующий кафедрой, 89135215054

Гаврилова Оксана Алексеевна, ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», старший преподаватель, 89048931399

Мерзликina Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», доцент, 89135374130

Моргун Василий Николаевич, доктор биологических наук, профессор, ФБУ «Государственный региональный Центр стандартизации, метрологии и испытаний в Красноярском крае, Республике Хакасия и Республике Тыва», директор, 83912361285