

Сличения национальных эталонов единицы длины в области измерений параметров отклонения от плоскостности оптических поверхностей COOMET.L-S15

Александр Леонидович Костриков¹, Владимир Семёнович Купко², Андрей Игоревич Шлома³,
Денис Александрович Новиков⁴, Валерий Григорьевич Лысенко⁵✉,
Екатерина Александровна Милованова⁶, Наталья Арменаковна Табачникова⁷,
Владимир Брониславович Макаревич⁸

^{1, 2, 3} Национальный научный центр «Институт метрологии», Харьков, Республика Украина, ¹alex_kost@ukr.net,

²volodimir.kupko@metrology.kharkov.ua, ³andreas0082@gmail.com

^{4, 5, 6, 7} Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия, ⁴dnovikov@vniims.ru,

⁵lysenko@vniims.ru✉, ⁶milovanova@vniims.ru, ⁷tobachnikova@vniims.ru

⁸ Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь, makarevich@belgim.by

Аннотация. Для декларирования и подтверждения измерительных и калибровочных возможностей национальных метрологических институтов Беларуси, России и Украины в области интерференционных измерений параметров отклонения от плоскостности в период 2015–2018 гг. проведены дополнительные сличения COOMET 570/UA/-a/12 (COOMET.L-S15). Представлены результаты дополнительных сличений COOMET 570/UA/-a/12. В соответствии с действующими правилами в 2020 г. Международное бюро мер и весов на основании данных экспертизы результатов сличений, выполненных ведущими экспертами ряда региональных метрологических организаций, включило сведения о полученных результатах в международную базу данных CIPM MRA. Результаты сличений позволили Беларуси и России продекларировать, а Украине подтвердить измерительные и калибровочные возможности в базе данных CIPM MRA.

Ключевые слова: интерферометр Физо, специальный первичный эталон, сличения, параметры отклонения от плоскостности

Для цитирования: Костриков А. Л., Купко В. С., Шлома А. И. и др. Сличения национальных эталонов единицы длины в области измерений параметров отклонения от плоскостности оптических поверхностей COOMET.L-S15 // Измерительная техника. 2021. № 7. С. 60–64. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-7-60-64>

Comparisons of national standards of the unit of length in the field of measurement of parameters of form deviation the flatness of optical surfaces COOMET.L-S15

Oleksandr L. Kostrikov¹, Volodymyr S. Kupko², Andrii I. Shloma³, Denis A. Novikov⁴, Valery G. Lysenko⁵✉,
Kate A. Milovanova⁶, Natalia A. Tabachnikova⁷, Vladimir B. Makarevich⁸

^{1, 2, 3} National Science Center “Institute of Metrology”, Kharkov, Ukraine, ¹alex_kost@ukr.net, ²volodimir.kupko@metrology.kharkov.ua, ³andreas0082@gmail.com

^{4, 5, 6, 7} Russian Research Institute for Metrological Service, Moscow, Russia, ⁴dnovikov@vniims.ru, ⁵lysenko@vniims.ru✉,

⁶milovanova@vniims.ru, ⁷tobachnikova@vniims.ru

⁸Belarussian State Institute of Metrology, Minsk, Belarus, makarevich@belgim.by

Abstract. Precision interference measurement of parameters of form optical surfaces are one of the most important type of the measurement in the field of the geometrical values. In countries-participants of this comparisons the special primary standards in this field of measurements take part in reproduction and transmission the unit of length in this field of measurements ensuring high measuring and calibrating capabilities countries in this type of measurement. In this article presents the result of supplementary comparisons COOMET 570/UA-a/12. The result of comparisons allowed to declare to Belarus and Russia, and to confirm to Ukraine their measuring and calibrating capability in database CIPM MRA.

Keywords: interferometer Fizo, special primary standard, comparisons, flatness parameters

Введение. Широкая востребованность прецизионных интерференционных измерений параметров отклонения

формы оптических поверхностей в машиностроении, оптоэлектронной промышленности, в микро- и наноэлектронике,

Таблица 1

Требования к эталону сравнения и выявленные дефекты

Вид дефекта	Требования к эталону (размер и количество дефектов)	Количество и состояние выявленного дефекта
Выколки	До 2×2 мм, не более пяти	Две, заматованные у фаски
	Более 2×2 мм, не допустимы	Отсутствуют
Матовые точки	Диаметр до 0,3 мм, не более трёх	Три
	Диаметр до 0,5 мм, не более двух	Две в краевой зоне
Царапины	Ширина не более 0,01 мм	Отсутствуют
Местные отклонения от плоскостности	Не более 0,03 мкм	Не более 0,03 мкм

а также ряде других высокотехнологичных отраслей позволяют считать этот вид измерений одним из важнейших в области измерений геометрических величин [1–4]. Эталоны стран-участниц сличений в области интерференционных измерений параметров отклонения от плоскостности участвуют в воспроизведении и передаче единицы длины средствами измерений, применяемым в прецизионных отраслях промышленности, и тем самым обеспечивают высокие измерительные и калибровочные возможности стран в этом виде измерений. В период 2015–2018 гг. с целью декларирования и подтверждения измерительных и калибровочных возможностей национальных метрологических институтов (НМИ) Беларуси, России и Украины в области интерференционных измерений параметров отклонения от плоскостности проведены дополнительные сличения национальных эталонов плоскостности (специальных первичных эталонов) КООМЕТ 570/UA/-a/12 (COOMET.L-S15) [5]. Затем полученные результаты в соответствии с действующими правилами оценены ведущими экспертами ряда региональных метрологических организаций. В конце 2020 г. Международное бюро мер и весов на основании результатов экспертизы сличений включило сведения о них в международную базу данных CIPM MRA. Результаты сличений позволили продекларировать Беларуси и России и подтвердить Украине их измерительные и калибровочные возможности в базе данных CIPM MRA.

Цель настоящей работы – декларация (подтверждение) измерительных и калибровочных возможностей России (ВНИИМС), Беларуси и Украины в области интерференционных измерений параметров отклонения от плоскостности.

Организация сличений. Лаборатория-пилот – ННЦ «Институт метрологии» (ННЦ ИМ), Украина. Цель сличений – установление степени эквивалентности национальных эталонов плоскостности (специальных первичных эталонов) Беларуси, России и Украины. Схема проведения сличений – круговые. Принцип сличения: лаборатории-участницы на национальных эталонах измеряют эталон сравнения (далее – меру) диаметром 120 мм, толщиной 30 мм в соответствии с требованиями технического протокола и инструкции по работе с национальными эталонами. По полученным результатам вычисляются опорное значение отклонения от плоскостности меры и расширенная неопределённость опорного значения.

Эталон сравнения. В качестве эталона сравнения использована мера плоскостности (в упаковке), принадлежащая ВНИИМС. Мера представляет собой круглую пластину, измерительная поверхность которой отполирована и выступает над общей поверхностью. В табл. 1 приведены требования к эталону сравнения и выявленные перед началом сличений его дефекты.

Методы выполнения измерений и условия внешней среды при проведении сличений. Отклонения от плоскостности

меры измеряли интерференционным методом. Отклонение от плоскостности меры определяли по изгибу интерференционных полос. Условия внешней среды: температура окружающего воздуха ($20,0 \pm 1,0$) °C; относительная влажность воздуха 40–50 %; изменение температуры воздуха не более 0,1 °C/ч.

Описание эталонов. Во время сличений лаборатории НМИ Украины и Беларуси (ННЦ ИМ и БелГИМ соответственно) использовали эталонные интерференционные установки на базе ИФ-77. Лаборатория ННЦ ИМ в качестве отсчётного устройства использовала цифровую фотокамеру.

Метрологические и технические характеристики интерференционной установки ИФ-77

Диаметр линейного поля зрения 125 мм
 Предел допускаемой основной погрешности 0,05 ИП*
 Предел допускаемого СКО* случайной составляющей основной погрешности 0,02 ИП*
 Источник излучения гелий-неоновый лазер ЛГН-56
 Длина волны лазера ЛГН-56 0,6328 мкм
 *ИП – интерференционная полоса; СКО – среднее квадратическое отклонение.

Метрологические и технические характеристики автоматизированной фотоэлектрической измерительной установки на базе интерферометра Физо

Диаметр линейного поля зрения 300 мм
 Расширенная неопределённость измерений на диаметре 100 мм 2,4 нм
 Среднее квадратическое отклонение результатов измерений 0,4 нм
 Источник излучения гелий-неоновый лазер
 Длина волны лазера 0,6328 мкм

В качестве эталона ВНИИМС применялась автоматизированная фотоэлектрическая измерительная установка на базе интерферометра Физо с автоматической компьютерной обработкой интерферограмм [6, 7], входящая в состав Государственного первичного специального

эталона единицы длины в области измерений параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей ГЭТ 183-2010 [8].

Результаты измерений. Результаты измерений меры плоскостности (отклонения от плоскостности δ) на эталонах ВНИИМС, БелГИМ и ННЦ ИМ приведены в табл. 2, где u_c , U – суммарная стандартная и расширенная неопределённости соответственно, расширенная неопределённость приведена при коэффициенте охвата $k=2$ и уровне доверия $P=95\%$. На эталонах БелГИМ и ННЦ ИМ измерения меры выполнялись в двух взаимно перпендикулярных диаметральных сечениях I–I, II–II, отмеченных на мере. На эталоне ВНИИМС измерения меры проводились по всей её поверхности на фотоэлектрической эталонной установке в составе ГЭТ 183-2010, регистрирующей интерференционную картину методом фазовых шагов [6].

Неопределённость измерений. Суммарные стандартные неопределённости u_j лабораторий-участниц с номером j приведены в табл. 3, где $u(x_j)$ – стандартные неопределённости лабораторий НМИ; x_j – входные величины: среднее арифметическое показаний интерферометра X_{ji} ; поправка $\delta_{o.п.}$, обусловленная отклонением показаний интерферометра; поправка $\delta_{o.ф.}$, учитывающая влияние отклонения формы референтной пластины в составе интерферометра;

Таблица 2

Отклонения от плоскостности меры плоскостности, измеренные лабораториями-участниками

НМИ	Сечение	δ , нм	u_c , нм	U , нм
ВНИИМС	По всей поверхности	+23,0	3,2	6,4
БелГИМ	I–I	+16,2	14,3	28,6
	II–II	+17,0	14,3	28,6
ННЦ ИМ	I–I	+16,3	14,3	28,6
	II–II	+16,5	14,3	28,6

Таблица 3

Стандартные неопределённости лабораторий-участниц

НМИ	X_{ji} , нм	$\delta_{o.п.}$, нм	$\delta_{o.ф.}$, нм	$\delta_{п.}$, нм	$\delta_{ош.}$, нм	u_j , нм
ВНИИМС	0,6	2,2	2,5	0,6	2,2	4,1
БелГИМ	0,5	9,1	–	6,3	9,1	14,3
ННЦ ИМ	0,5	9,1	–	6,3	9,1	14,3

Таблица 4

Результаты проверки по E_n -критерию и степени эквивалентности

НМИ	x_j , нм	u_j , нм	x_{ref} , нм	u_{ref} , нм	E_n	d_j , нм	$u(d_j)$, нм	$U(d_j)$, нм
ВНИИМС	23,0	4,1	22,1	3,8	0,30	0,9	1,5	3,0
БелГИМ	17,0	14,3	22,4	3,1	0,19	–5,4	14,0	28,0
ННЦ ИМ	16,5	14,3	22,4	3,1	0,21	–5,9	14,0	28,0

поправка $\delta_{п.}$, определяемая повторяемостью показаний интерферометра; поправка $\delta_{ош.}$, связанная с ошибкой оператора; стандартная неопределённость X_{ji} типа А, стандартные неопределённости $\delta_{o.п.}$, $\delta_{o.ф.}$, $\delta_{п.}$, $\delta_{ош.}$ типа В.

Процедура оценки эквивалентности национальных эталонов, участвующих в сличениях. Результаты измерений, выполненные участниками сличений, были проверены двумя методами: по E_n -критерию; по степени эквивалентности эталонов d_j , $u(d_j)$ [9–11].

Проверка результатов измерений по E_n -критерию.

Для проверки внутренней плотности между результатами отдельных измерений был использован E_n -критерий ($|E_n| \leq 1$ при $k=2$):

$$E_n = \frac{1}{k} \frac{x_j - x_{ref}}{\sqrt{u_j^2 - u_{ref}^2}};$$

$$x_{ref} = \frac{\sum_{j=1}^n p_j x_j}{\sum_{j=1}^n p_j};$$

$$u_{ref} = \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{u_j^2} \right)^{-1/2};$$

$$p_j = u_j^{-2},$$

где x_j – результат измерений лаборатории с номером j ; u_j – стандартная неопределённость, заявленная лабораторией с номером j ; p_j – вес результата измерений лаборатории с номером j ; x_{ref} – опорное значение (среднее взвешенное) сличений; u_{ref} – стандартная неопределённость опорного значения; n – число участников сличений.

Значения E_n -критерия для меры отклонения от плоскостности представлены в табл. 4.

Все значения критерия E_n для меры отклонения от плоскостности у участников сличений меньше установленного уровня $|E_n| \leq 1$.

Проверка результатов измерений по степени эквивалентности эталонов. Степень эквивалентности d_j j -го института определяется как отклонение результата измерения от опорного значения и рассчитывается по формуле

$$d_j = x_j - x_{ref},$$

где опорное значение x_{ref} рассчитано по формуле (1).

Неопределённость $u(d_j)$ степени эквивалентности вычисляется по выражению

$$u(d_j) = \sqrt{u^2(x_j) - u^2(x_{ref})},$$

где $u(x_j)$ – неопределённость измерений величины x j -м институтом; $u(x_{ref})$ – неопределённость измерений опорного значения x_{ref} .

Знак минус в формуле (2) возникает вследствие корреляции результата измерения и опорного значения, вычисленного с учётом этого результата измерения.

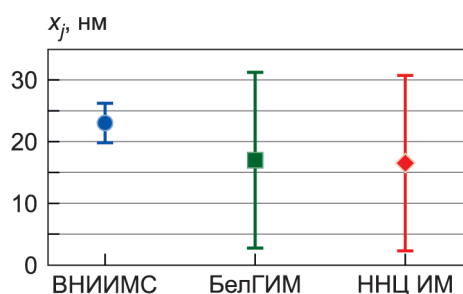


Рис. 1. Результаты измерений отклонения от плоскостности x_j эталона сравнения ВНИИМС, БелГИМ, ННЦ ИМ и стандартные неопределённости этих измерений

Fig. 1. Results of measurements of flatness deviation x_j of the reference standard and standard uncertainties of these measurements

Эталоны эквивалентны, если выполняется одно из двух условий:

$$|d_j| \leq 2u(d_j);$$

$$|d_j| \leq U(d_j), \quad (3)$$

где $U(d_j)$ – расширенная неопределённость степени эквивалентности.

Результаты проверки по степени эквивалентности для меры отклонения от плоскостности представлены также в табл. 4. Согласно табл. 4 при сопоставлении d_j , $U(d_j)$ условие (3) выполняется, следовательно, сличаемые эталоны ВНИИМС, БелГИМ и ННЦ ИМ эквивалентны.

Отклонения результатов измерений от опорного значения и стандартные неопределённости этих отклонений для меры отклонения от плоскостности на рис. 1. Степени эквивалентности и стандартные неопределённости степеней эквивалентности НМИ приведены на рис. 2.

Выводы. Результаты сличений свидетельствуют о соответствии неопределённостей измерений заявленным значениям. Сличаемые эталоны эквивалентны. Результаты проведённых сличений эталонов единицы длины в области измерений отклонений от плоскостности ВНИИМС, БелГИМ и ННЦ ИМ могут быть признаны положительными.

По результатам сличений ВНИИМС и БелГИМ получили новые строки в международной базе данных измерительных и калибровочных возможностей CIPM MRA, а ННЦ ИМ подтвердил свою соответствующую строку.

Список литературы

1. *Comparison of flatness and surface roughness parameters when face milling and turning*, ed. W. Zebala, I. Mankova, Cracow university technology development in machining technology, 2017, vol. 7, pp.18–27.
2. Новиков Д. А., Кононогов С. А., Золотаревский С. Ю., Вяшняков Г. Н., Левин Г. Г., Ляковский В. Л. Анализ неопределённостей, обусловленных методическими и инструментальными

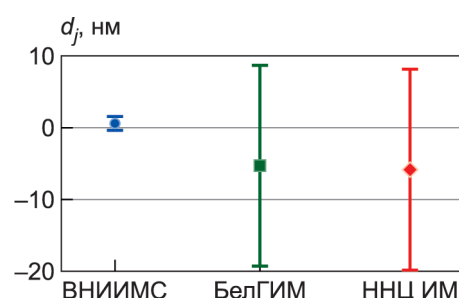


Рис. 2. Степени эквивалентности d_j и стандартные неопределённости степеней эквивалентности ВНИИМС, БелГИМ, ННЦ ИМ; $d_j=0$ – опорное значение

Fig. 2. Degrees of equivalence d_j and standard uncertainties of degrees of equivalence of NMI; $d_j=0$ – reference value

погрешностями интерферометрии параметров рельефа и формы поверхности // Метрология. 2013. № 8. С. 31–37.

3. Золотаревский С. Ю., Новиков Д. А., Гусев А. С., Ляковский В. Л. Фрактальные методы характеристики топографии и текстуры поверхности // Метрология. 2013. № 2. С. 33–40.

4. Крутиков В. Н., Золотаревский С. Ю., Лысенко В. Г., Ляковский В. Л. Топологические параметры текстуры функциональных поверхностей // Метрология. 2013. № 2. С. 25–32.

5. Final report of the comparisons (COOMET.L-S15), *Metrologia*, 2018, vol. 55, Tech. suppl. 04006.

6. Вишняков Г. Н., Золотаревский С. Ю., Новиков Д. А. Измерительно-калибровочная установка на базе большепольной интерферометрии Физо // Метрология. 2012. № 12. С. 17–24.

7. Горшков В. А., Ломакин А. Г., Невров А. С., Новиков Д. А. Технологическая программа обработки интерферограмм методом Фурье-преобразования // Оптический журнал. 2011. Т. 78. № 4. С. 44–50.

8. Лысенко В. Г., Табачникова Н. А., Новиков Д. А. Государственный первичный специальный эталон единицы длины для параметров отклонений от плоскостности оптических поверхностей размером до 200 мм // Законодательная и прикладная метрология. 2015. № 6. С. 10–13.

9. Чуновкина А. Г., Харитонов И. А. Международные сличения, как инструмент подтверждения измерительных и калибровочных возможностей НМИ // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 14–17.

10. Чуновкина А. Г., Бурмистрова Н. А., Звягин Н. Д. Об одном подходе к оцениванию результатов ключевых сличений эталонов при несогласованных данных // Измерительная техника. 2013. № 6. С. 3–6.

11. Бурмистрова Н. А. Разработка и исследование алгоритма обработки несогласованных данных ключевых сличений эталонов // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 7–12.

Reference

1. *Comparison of flatness and surface roughness parameters when face milling and turning*, ed. W. Zebala, I. Mankova, Cracow

university technology development in machining technology, 2017, vol. 7, pp. 18–27.

2. Novikov D. A., Kononogov S. A., Zolotarevskii S. Yu., Vishnyakov G. N., Gusev A. S., Levin G. G., Lyaskovskii V. L., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 9, pp. 1006–1010. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0320-0>

3. Zolotarevsky S. Yu., Novikov D. A., Gusev A. S., Lyaskovskii V. L., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 3, pp. 247–251. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0188-z>

4. Krutikov V. N., Zolotarevsky S. Yu., Lysenko V. G., Topological parameters of functional surface texture, *Metrologiya*, 2013, no. 2, pp. 25–32. (In Russ.)

5. Final report of the comparisons (COOMET.L-S15), *Metrologia*, 2018, vol. 55, Tech. suppl. 04006.

6. Vishnyakov G. N., Novikov D. A., Measuring-calibrating installation on the base of wide-field Fize interferometry, *Metrologiya*, 2012, no. 12, pp. 17–24. (In Russ.)

7. Gorshkov V. A., Lomakin A. G., Nevrov A. S., Novikov D. A., A technological program for processing interferograms by Fourier transformation, *Optical Journal*, 2011, vol. 78, no. 4, pp. 44–50. (In Russ.)

8. Lysenko V. G., Tabachnikova N. A., Novikov D. A., State primary special standard the unit of length for parameters of flatness of optical surfaces size till 200 mm, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2015, no. 6, pp. 10–13. (In Russ.)

9. Chunovkina A. G., Kharitonov I. A., *Measurement Techniques*, 2007, vol. 50, no. 7, pp. 711–714. <https://doi.org/10.1007/s11018-007-0136-x>

10. Chunovkina A. G., Burmistrova N. A., Zvyagin N. D., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 577–583. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0248-4>

11. Burmistrova N. A., *Measurement Techniques*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1103–1112. <https://doi.org/10.1007/s11018-015-0587-4>

Статья поступила в редакцию 09.04.2021; принята к публикации 01.06.2021.