

## Измерение рельефа поверхности большой площади оптическим интерференционным микроскопом

*И. А. Выхристюк<sup>1</sup>, Р. В. Куликов<sup>1\*</sup>, Е. В. Сысов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\* e-mail: rstalcker@ngs.ru

**Аннотация.** Представлена процедура сшивки участков поверхности, измеряемых оптическим интерференционным микроскопом, для получения микрорельефа большей площади. Показано, что использование данной процедуры позволяет выполнять измерения, недоступные при обработке разрозненных участков поверхности. Приводятся результаты измерений и сшивки.

**Ключевые слова:** сшивка поверхности, интерференционный микроскоп

## Measurement of the large area surface relief by optical interference microscope

*I. A. Vykhristyuk<sup>1</sup>, R. V. Kulikov<sup>1\*</sup>, E. V. Sysoev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation  
\* e-mail: rstalcker@ngs.ru

**Abstract.** It was presented the procedure of stitching surface regions measured by optical interference microscope to get a microrelief of large area. It was shown that usage of that procedure allows to perform measurements which are difficult at the processing of measured surface regions separately. Measurement results and stitching are presented.

**Keywords:** surface stitching, interference microscope

### *Введение*

Измерения на современном оптическом интерференционном микроскопе выполняются для относительно небольшой области. Размеры этой области ограничены увеличением оптической системы микроскопа и размером матрицы, используемой в микроскопе цифровой видеокамеры.

Существует множество задач [1 - 6], в которых необходимо выполнять измерения на участке поверхности, большем, чем область измерения микроскопа. В основном эти задачи относятся к измерению с высоким разрешением формы поверхности большой площади. Также, к ним можно отнести измерение отклонения от плоскостности отдельных стоящих участков поверхности, которое сложно выполнить, когда эти участки не попадают в одну область измерения микроскопа. Применение других приборов [7, 8] позволяет получать рельеф поверхности большой площади за одно измерение, но может не обеспечить достаточного поперечного разрешения. В случае использования микроскопа для уве-

личения области измерения недостаточно просто уменьшить увеличение оптической системы – это приводит к ухудшению поперечного разрешения. Поэтому, оптимальным решением в случае использования оптического интерференционного микроскопа является проведение серии измерений соседних участков измеряемой поверхности и последующее выполнение процедуры сшивки.

В данной работе, на базе микроскопа-нанопрофилометра интерференционного МНП-1 [9], описывается способ и приводятся результаты применения процедуры сшивки при измерении микрорельефа поверхности большой площади.

### *Описание процесса измерения и сшивки*

Измерения в оптическом интерференционном микроскопе основаны на использовании интерференции света. В МНП-1, на котором выполнялась представляемая работа, для формирования интерференции света используется интерферометр Линника с источником частично-когерентного излучения (светодиод), парой микрообъективов с увеличением  $5\times$  и цифровой видеокамерой с размерами матрицы  $15\text{ мм} \times 15\text{ мм}$ . Такая комплектация микроскопа определяет область измерения размером  $3\text{ мм} \times 3\text{ мм}$ . Интерферометр установлен на каретку однокоординатного моторизованного стола. При измерении микрорельефа поверхности интерферометр перемещается по оси  $Z$  в направлении к поверхности объекта измерения. Для перемещения объекта измерения в  $XY$  плоскости в МНП-1 используется двухкоординатный моторизованный стол.

Чтобы получить серию из  $N$  измерений, необходимых для сшивки, образец перемещается при помощи двух-координатного стола. В каждом, новом положении образца в плоскости  $XY$  выполняется измерение участка поверхности, находящегося в области измерения микроскопа. Результат измерения – высота рельефа участка поверхности  $z_n(i, j)$ , где  $i$  и  $j$  – положение пикселя в строке и столбце матрицы видеокамеры, соответственно,  $n$  – номер измерения, и абсолютное положение измеренного участка  $x_n$  и  $y_n$  сохраняются на жесткий диск компьютера.

Сшивка  $N$  участков поверхности  $z_1(i, j), z_2(i, j), \dots, z_n(i, j)$  выполняется следующим образом. Результирующий рельеф поверхности  $Z(I, J)$  определяется в области добавляемых к нему измеренных участков поверхности, а именно:

$$I \in [\min(x_n / s_x), \max(x_n / s_x) + W],$$

$$J \in [\min(y_n / s_y), \max(y_n / s_y) + H],$$

где  $s_x, s_y$  – размеры пикселя в области измерения микроскопа,  $W$  и  $H$  – ширина и высота области измерения микроскопа, соответственно. Каждый измеренный участок поверхности  $z_1, z_2, \dots, z_N$  реплицируется в соответствующую позицию в результирующий рельеф  $Z$ . При добавлении каждого участка поверхности в результирующий рельеф выполняется проверка пересечения областей, если тако-

вая имеется, то значение высоты в каждой измеренной точке этой области вычисляется, как среднее значение между высотой в рельефе  $Z$  и высотой в точке, добавляемого участка:

$$I = i + x_n / s_x, \quad J = j + y_n / s_y,$$

$$Z(I, J) = z_n(i, j), \text{ если } Z(I, J) = 0,$$

$$Z(I, J) = (Z(I, J) + z_n(i, j)) / 2, \text{ если } Z(I, J) \neq 0.$$

Учитывая погрешность датчика перемещения, контролирующего положение интерферометра микроскопа по оси  $Z$ , и то, что ось интерферометра может быть не перпендикулярна к плоскости стола, между соседними измеренными участками поверхности выполняется коррекция по высоте. Эта операция необходима, чтобы устранить появления возможных «ступенек» между участками.

Для коррекции стыковки добавляемых участков поверхности по высоте определяется величина коррекции  $\delta z_{\text{кор}}$ . Для этого при каждом добавлении измеренного участка поверхности  $z$  в результирующий рельеф  $Z$  по области пересечения  $z$  и существующих в  $Z$  данных формируется распределение разницы высот  $\delta z$ . Значение  $\delta z_{\text{кор}}$  определяется значением  $\delta z$ , имеющее максимальную амплитуду в этом распределении. Далее, в  $Z$  добавляется уже откорректированный по высоте рельеф:

$$Z(I, J) = z_n(i, j) - \delta z_{\text{кор}}.$$

Другая коррекция, выполняемая при сшивке, связана с тем, что система координат матрицы видеокамеры и  $XU$  стола могут быть повернуты друг относительно друга на некий угол  $\alpha$ . Величина угла может быть определена относительно простой процедурой. Далее, для каждого добавляемого участка поверхности, вычисляются значения коррекции  $\delta x$  и  $\delta y$ :

$$\Delta x = x_n - x_0, \quad \Delta y = y_n - y_0,$$

$$\text{если } \Delta x \neq 0, \quad \delta x = \Delta x \cdot (1 - \cos \alpha),$$

$$\delta y = \Delta x \cdot \sin \alpha;$$

$$\text{если } \Delta y \neq 0, \quad \delta x = \delta x - \Delta y \cdot \sin \alpha,$$

$$\delta y = \delta y - \Delta y \cdot (1 - \cos \alpha).$$

Затем, значения  $\delta x$  и  $\delta y$  используются для смещения позиции, в которую добавляется измеренный участок поверхности:

$$I = i + (x_n + \delta x) / s_x, J = j + (y_n + \delta y) / s_y.$$

### ***Результаты применения сшивки***

Используя описанную процедуру сшивки были выполнены измерения рельефа поверхности площадью большей, чем область измерения МНП-1. При этом поперечное разрешение проведенного измерения было сохранено исходным.

На рис. 1 показан пример измерения монеты диаметром  $\sim 17,5$  мм. Для получения этого результата было измерено 47 участков поверхности размером  $3 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$ .



Рис. 1. Результат измерения монеты:

3D рельеф *а* – сшитых и *б* – одиночного участков поверхности

Массив, представляющий одиночный участок рельефа поверхности (рис. 1, *б*), содержит  $2048 \times 2048$  точек. Массив результирующего рельефа поверхности (рис. 1, *а*), содержит не менее  $12000 \times 12000$  точек.

В процессе выполнения процедуры сшивки, максимальное отклонение по высоте в общей между сшиваемыми участками поверхности области составило величину  $\sim 8$  мкм, а смещение в плоскости  $XU \sim 120$  мкм. Применение коррекций высоты и поворота, описанных выше, улучшило результат сшивки: перепады высоты соседних участков стали менее, чем  $0,5$  мкм (сравнимо с разрешающей способностью измерения); смещение в плоскости  $XU$  уменьшилось до  $\sim 3$  мкм (оценочное значение).

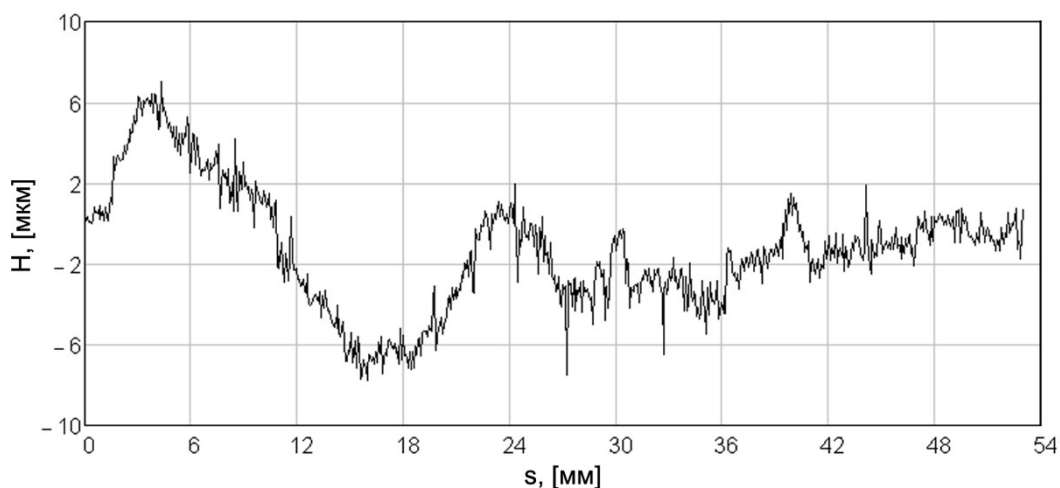


Рис. 2. Радиальный профиль высоты края монеты:  
 $H$  – высота рельефа,  $s$  – расстояние

Как видно из результатов измерений – 3D рельеф сшитых участков поверхности (рис. 1, *a*) и профиль высоты края монеты (рис. 2), в областях переходов между участками резких перепадов по высоте и смещений в плоскости  $XU$  не наблюдается, что свидетельствует о высоком качестве сшивки.

Корректная сшивка участков поверхности между собой позволяет использовать данный способ при выполнении измерений, недоступных при обработке разрозненных участков поверхности, например, при измерении отклонения интересных участков поверхности, находящихся далеко друг от друга, от заданной плоскости. В приведенном примере (рис. 2), использование сшивки позволило измерить отклонение от плоскости края монеты. Величина отклонения не превышает 7 мкм.

### *Заключение*

Применение процедуры сшивки результатов измерений, выполненных оптическим интерференционным микроскопом, позволило измерить рельеф поверхности площадью больше, чем область измерения микроскопа. Показано измерение монеты диаметром  $\sim 17,5$  мм, выполненное на МНП-1 с областью измерения  $3 \text{ мм} \times 3 \text{ мм}$ . Радиальный профиль высоты рельефа поверхности, взятый по краю монеты, показывает применимость процедуры сшивки, как для измерения шероховатости в таких сложных сечениях, так и для измерения отклонений в общей форме.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. V. Rankov, R.J. Locke, R.J. Edens An algorithm for image stitching and blending // Three-Dimensional and Multidimensional Microscopy: Image Acquisition and Processing XII (San Jose, January 25-27, 2005): proceedings. San Jose, 2005. P. 190-199.

2. P. Murphy, J. Fleig, G. Forbes, D. Miladinovic, G. DeVries "Subaperture stitching interferometry for testing mild aspheres" // Proc. SPIE, 6293 (2006).
3. Ma B., Zimmermann T., Rohde M., Winkelbach S., He F., Lindenmaier W., Dittmar K.E.J. "Use of autostitch for automatic stitching of microscope images" // Micron. 2007. Volume 38. Number 5. P. 492-499.
4. Rommeveaux A., Barrett R. "Micro-stitching interferometry at the ESRF" // Nuclear instruments and methods in physics research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2010. Volume 616. Number 2-3. P. 183-187.
5. Hirokatsu Yumoto, Takahisa Koyama, Satoshi Matsuyama, Kazuto Yamauchi, Haruhiko Ohashi "Stitching interferometry for ellipsoidal x-ray mirrors" // Review of Scientific Instruments. 2016. Volume 87. Issue 5.
6. Huang S. Wang L. Zheng Y. Wang F. Su Y. "Stitching error compensation for large-area microstructures based on digital oblique scanning exposure mode" // Applied Physics Express. 2020. Volume 13. Number 11. P. 116501.
7. Schwab X., Kohler C., Korner K., Eichhorn N., Osten W. "Improved micro topography measurement by LCoS-based fringe projection and z-stitching" // Proc. SPIE, Vol. 6995, 69950Q (2008).
8. Полещук А., Хомутов В., Маточкин А., Насыров Р., Черкашин В. "Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей" // Фотоника. 2016. С. 38-51.
9. Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Поташников А.К., Разум В.А., Степнов Л.М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. 46, № 2. С. 119–128.
10. Линник В.П. Прибор для интерференционного исследования микропрофиля поверхности - "микропрофилометр" // Докл. АН СССР. – 1945. – т. 49. – №9. – с. 656-657.

© И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев, 2022