

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.891

В.М. Давыдов, О.В. Прохорец, В.А. Языков

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС 3D-МЕТРИИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ¹

Рассмотрена подготовка данных для 3D-метрии шероховатости поверхности стилусным методом. Для отыскания плоскости тренда применён способ аппроксимации функции, составленной из условия равных объёмов вершин и впадин над плоскостью и ниже плоскости соответственно. Разработан информационно-измерительный комплекс и программное обеспечение для 3D-метрии шероховатости поверхности.

Ключевые слова: микрорельеф, шероховатость, многомерная линейная аппроксимация, информационно-программные средства, 3D-метрия шероховатости поверхности, информационно-измерительный комплекс.

Шероховатость поверхности представляет собой одну из основных геометрических характеристик, определяющих качество поверхности изделий, и оказывает влияние на эксплуатационные показатели (износ поверхностей, подвергающихся трению, появление трещин из-за усталости материала, смятие рабочих поверхностей деталей, коррозионное и эрозионное воздействие, разрушение вследствие кавитации и т.п.).

Придание поверхностям деталей надлежащих свойств, способствующее значительному повышению показателей качества эксплуатируемых машин, и в первую очередь показателей их надежности и долговечности, сформировало подход к обработке материалов, известный как инженерия поверхностного слоя изделий.

Набор параметров шероховатости для оценки их влияния на эксплуатационные характеристики изделий постоянно увеличивается. Изменяются также методы и средства измерения шероховатости: наблюдается переход от 2D-метрии к 3D-метрии. Поэтому создание информационно-измерительных систем для качественных показателей обрабатываемых поверхностей является актуальной проблемой.

В настоящее время в 2D-метрии для оценки шероховатости реальных поверхностей используются результаты сканирования поверхностей на контактных профилометрах. Измерительная игла профилометра связана с датчиком, в котором изменение высоты микронеровностей вызывает изменение электрического напряжения пропорционально перемещению иглы. После усиления электрического сигнала и его оцифровки создаётся массив данных высот микронеровностей, который сохраняется в файле формата RST. Результаты измерений линейной трассы обрабатываются с вычислением значений требуемых параметров шероховатости.

В развитии информационно-измерительных систем, в частности систем трехмерного измерения шероховатости поверхности, существует сложность математической обработки результатов. Применение вычислительной техники создает предпосылки для превращения автоматизированных измерительных систем в весьма эффективный инструмент, находящий применение в самых разнообразных исследованиях.

В лаборатории технических измерений шероховатости Тихоокеанского государственного университета для комплексной оценки качества сопрягаемых поверхностей методами 3D-метрии шероховатости реальных поверхностей разработана специальная информационно-измерительная система. Она представляет собой программно-технический ком-

¹ Работа выполнена в рамках Программы стратегического развития ТОГУ (г. Хабаровск, 2012–2015 гг.).

плекс для контроля шероховатости поверхностей методами 3D-метрии (рис. 1). Техническая часть комплекса состоит из контактного профилометра SURFCOM 1800D, предметного столика с микрометрическим винтом для поперечного перемещения, шагового привода микрометрического винта и электронного блока управления, связанного с ЭВМ, управляющей профилометром. Программную часть комплекса составляют: программа TMS, обеспечивающая измерение и обработку данных одной трассы, программа AutoStep, обеспечивающая поперечное смещение предметного столика, и программа RST-EXL для формирования двумерного массива значений высот микронеровностей в миллиметрах.



Рис. 1. Информационно-измерительный комплекс для контроля шероховатости поверхностей методами 3D-метрии

Результаты сканирования поверхностей на контактном профилометре SURFCOM 1800D с использованием устройства перемещения измеряемого образца в направлении, перпендикулярном измерительной трассе, с помощью микрометрического винта, представляют собой набор файлов. Количество файлов соответствует количеству трасс, пройденных по исследуемой площади поверхности. Шаговый привод выполняет поворот микрометрического винта после каждого прохождения трассы. Общее управление всем процессом сканирования и управление шаговым двигателем устройства осуществляется с помощью программы AutoStep. Программа RST-EXL после формирования

двухмерного массива высот микронеровностей позволяет выполнять корректировку массива с удалением плоскости тренда, возникающего при неточной установке образца по отношению к плоскости измерения.

При стилусном методе измерения шероховатости при получении информации о микрорельефе поверхности практически неизбежно возникают ситуации, связанные с данным методом, влияющие на результаты. Это связано в первую очередь с неточностью установки исследуемого образца по отношению к трассе измерения и с невозможностью вести отсчёт от одной базы [1].

Усовершенствование метода, основанное на установке единой базы отсчёта для всех параллельных трасс измерений, позволило уменьшить погрешность смещения соседних трасс, но в целом поверхность образца оказывается наклонённой к плоскости измерения. При таком методе измерения плоскость определяется двумя взаимно перпендикулярными направляющими прибора, и наклон возникает из-за погрешности установки образца на измерительном устройстве. При двумерной оценке шероховатости погрешность установки учитывается удалением линейного тренда в пределах длины измерений [2]. В данной статье, на основе допущения о линейности тренда, представлены методика и результаты работы по удалению линейного тренда в виде плоскости для трёхмерной профилометрии плоского образца.

Результаты трёхмерной профилометрии в двух взаимно перпендикулярных направлениях величин профиля поверхности представляют собой табличную функцию $z_{REAL}(x, y)$. Искомая плоскость – плоскость тренда поверхности – описывается выражением

$$z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y, \quad (1)$$

где a_0, a_1, a_2 – коэффициенты, определяющие положение плоскости в пространстве основных координатных плоскостей (определяются в процессе автоматизированного поиска).

Табличная функция $zREAL(x, y)$ получена на контактном профилометре SURFCOM 1800D. Схема измерений аналогична описанной в работе [1] (выполнение многих измерений по параллельным трассам). Измерение вдоль трассы выполнялось с разрешением менее 1 мкм, расстояние между трассами – 5 мкм. В отличие от [1] профилометр позволяет сохранять настройку начала отсчёта при переходе на следующую трассу и вести отсчёт от одной базы. Кроме того, особенностью измерений на приборе является то, что начальная точка отсчёта устанавливается случайным образом – при первом касании на первой трассе измерений.

Данные, полученные в результате профилометрии, обрабатывались по специальному алгоритму для удаления тренда и приведения данных к средней плоскости всего диапазона измерений профиля. Для уменьшения объёма информации и времени обработки уменьшалось разрешение измерений вдоль трассы с различными коэффициентами уменьшения: 10, 100 и 1000. При этом оценивалось влияние уменьшения разрешения на точность результатов удаления тренда.

Обычно для отыскания плоскости тренда применяют минимизацию суммы квадратов отклонений значений табличной функции от значений аппроксимирующей функции в соответствующих точках:

$$F(c) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta z(x, y))^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{i,j}(c)^2 \Rightarrow \min,$$

где $c = (a_0, a_1, a_2)^T$; $\Delta z(x, y)_{i,j} = (zREAL(x, y)_{i,j} - z(c, (x, y)_{i,j})) \cos \varphi$; $z(c, (x, y)_{i,j}) = matrix(i, j, z(c, (x, y)_{i,j}))$ – матрица значений функции (1) в точках сетки с координатами Δxi , Δyj (искомая плоскость тренда); $zREAL(x, y)_{i,j}$ – табличная функция в точках сетки с координатами Δxi , Δyj ; $i=1, \dots, m$ и $j=1, \dots, n$ – число точек и число рядов измерений соответственно; Δx и Δy – интервалы приращений координат между точками и рядами измерений соответственно; φ – угол нормали искомой плоскости к оси z ; $f_{i,j}(c) = (f_{1,1}(c), \dots, f_{i,j}(c))^T$ – матрица значений.

Функция может быть минимизирована решением системы из трёх уравнений, в которой производные от функций по каждой неизвестной приравнены к нулю.

В данной работе для поиска расположения плоскости тренда предложен метод подбора $c = (a_0, a_1, a_2)^T$ для функции

$$F(c) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left(\frac{1}{6} \Delta x \Delta y (\Delta z(x + \Delta x, y) + 2\Delta z(x + \Delta x, y + \Delta y) + 2\Delta z(x, y) + \Delta z(x, y + \Delta y)) \right)_{i,j} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{i,j}(c) \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta z(x + \Delta x, y) &= zREAL(x, y)_{i+1,j} - (a_0 + a_1(i + 1)\Delta x + a_2j\Delta y); \\ \Delta z(x + \Delta x, y + \Delta y) &= zREAL(x, y)_{i+1,j+1} - (a_0 + a_1(i + 1)\Delta x + a_2(j + 1)\Delta y); \\ \Delta z(x, y) &= zREAL(x, y)_{i,j} - (a_0 + a_1i\Delta x + a_2j\Delta y); \\ \Delta z(x, y + \Delta y) &= zREAL(x, y)_{i,j+1} - (a_0 + a_1i\Delta x + a_2(j + 1)\Delta y), \end{aligned}$$

составленной из условия равных объёмов вершин и впадин над плоскостью и ниже плоскости соответственно. Объём определялся численным интегрированием. На рис. 2 представлена схема вычисления элементарного объёма.

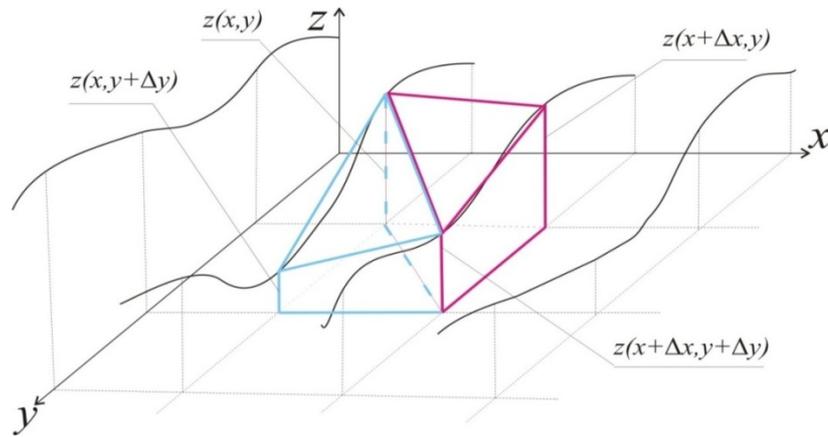


Рис. 2. Схема вычисления элементарного объёма

Для отыскания минимума функции $F(c)$ применим метод покоординатного движения. Начальная точка $c_0 = (a_0, a_1, a_2)$ и максимальные величины шагов движения к экстремуму (величины приращений $\Delta a_0, \Delta a_1, \Delta a_2$) устанавливаются в области допустимых значений переменных c , а минимальные – ошибкой определения оптимальных значений. Достижение минимума определяется входением в ε -окрестность, определяемую точностью поиска. Условием окончания поиска принята норма значений целевой функции

$$|F(c)| \leq \varepsilon,$$

где ε – точность достижения минимума; F_0 – значения функции в точках.

Удаление тренда выполняется пересчётом табличной функции $zREAL(X, Y)$:

$$zREAL(x, y) = (zREAL(x, y) - zP(x, y)) \cos \gamma,$$

где $zP(x, y)$ – матрица значений функции (1), рассчитанная для значений вектора c , определённого в процедуре минимизации; γ – угол наклона плоскости тренда к координатной плоскости XOY .

Из общего уравнения плоскости

$$\cos \gamma = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}},$$

где постоянные A, B и C определены для $c = (a_0, a_1, a_2)$.

Так как для большинства случаев функция $zREAL(x, y)$ задаётся на регулярной сетке с постоянными значениями Δx и Δy , то функция (2) может быть заменена на более простую:

$$F(c) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (zREAL(x, y)_{i,j} - (a_0 + a_1 i \Delta x + a_2 j \Delta y)).$$

На рис. 3 представлены графики на регулярной сетке табличной функции $zREAL(x, y)$ и плоскости.

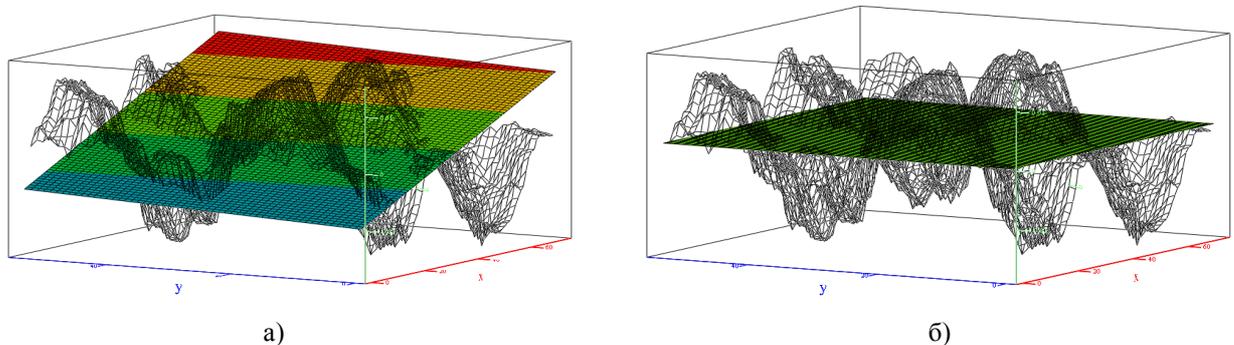


Рис. 3. Графики на регулярной сетке: а - начальное положение; б - после процедуры поиска плоскости

Предлагаемый метод программно реализован в приложении RST-EXL. Исходными данными для работы приложения являются результаты измерения шероховатости исследуемой поверхности $zREAL(x, y)$.

Программа RSR-EXL выполняет чтение файлов формата RST, полученных в результате измерения шероховатости на аппаратах SUKFCOM1800D и других, использующих данный формат. Программа формирует двухмерный массив значений высот микронеровностей в миллиметрах. Массив привязан к регулярной координатной сетке. По координате X шаг сетки определяется как

$$\Delta x = \Delta x_{min} L,$$

где Δx_{min} – шаг между точками измерений вдоль трассы измерений, мм.

По координате Y шаг сетки Δy , мм, устанавливается равным интервалу между трассами (строками) измерений.

Полученный массив (как преобразованный, так и не преобразованный) может быть передан в файл формата программы Excel в виде таблицы и в файл формата txt в виде последовательностей записей координат точек измерений для всех трасс [4].

Результатами работы программы являются также значения a_0, a_1, a_2 . Результаты работы программы далее могут быть использованы для трёхмерного анализа шероховатости поверхностей [3] и решения контактных задач с учётом шероховатости поверхности.

На рис. 4 показан пласт точек, построенный по результатам сканирования шлифованной поверхности с шероховатостью $Ra\ 0,5$.

На рис. 5 показана твердотельная модель с поверхностью, сформированной по данным измерения реальной поверхности, полученной обработкой методом фрезерования, с шероховатостью $Ra\ 6,3$. Количество трасс равно 55, что описывает измеренный участок шириной 0,27 мм и длиной 1 мм.

Таблица в Excel может использоваться для обработки данных по стандартным алгоритмам.

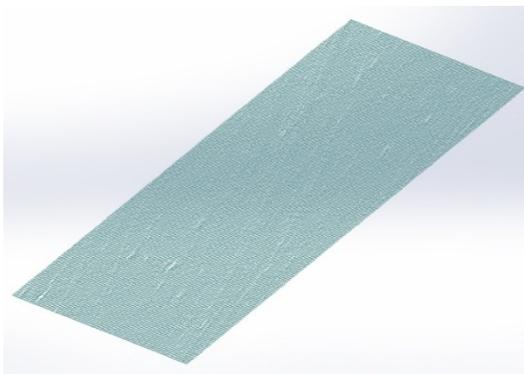


Рис. 4. Пласт точек

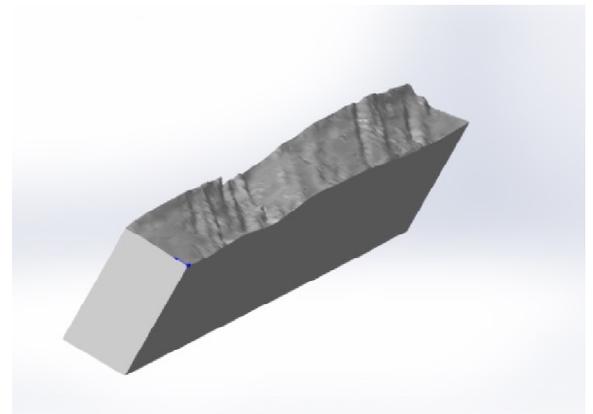


Рис. 5. Твердотельная модель

Выводы:

1. Рассмотрен стилусный метод подготовки данных для 3D-метрии шероховатости поверхности.
2. Для отыскания плоскости тренда применён способ аппроксимации функции, составленной из условия равных объёмов вершин и впадин над плоскостью и ниже плоскости соответственно.
3. Разработано измерительное устройство и программное обеспечение для 3D-метрии шероховатости поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ольшевский, А.А. Методика решения контактных задач для тел произвольной формы с учетом шероховатости поверхности методом конечных элементов: автореф. дис.... канд. техн. наук / А.А. Ольшевский. – Брянск, 2003. – 121 с.
2. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982. – 429 с.
3. Порошин, В.В. Основы комплексного контроля топографии поверхности деталей: монография / В.В. Порошин. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 196 с.
4. Прохорец, О.В. Подготовка данных для 3D-метрии шероховатости поверхности / О.В. Прохорец, В.М. Давыдов, В.А. Языков // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2014. – С. 193-198.

Материал поступил в редколлегию 18.03.15.