

УДК 65.012.122

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ

¹Кузнецова Е.М., ²Овсянников В.Е., ²Некрасов Р.Ю., ²Путилова У.С.

¹ФГБОУ ВО «Курганский государственный университет», Курган, e-mail: app@kgsu.ru;

²ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Тюмень, e-mail: vik9800@mail.ru

В данной статье рассмотрены вопросы повышения точности моделирования профилей шероховатости поверхности в случае регулярного характера микрорельефа. В качестве исходных данных для рассмотрения берутся поверхности, обработанные чистовым точением и алмазным выглаживанием с жестким закреплением индентора. Модель шероховатости поверхности строится на базе использования методологического аппарата фрактальной геометрии. Построение модели основано на использовании алгоритма случайных сложений. Исходными данными является фрактальная размерность профиля и параметры закона распределения. Показано, что использование традиционных законов распределения случайных величин: нормального (Гаусса), Рэлея и Вейбула, не позволяет получать требуемую точность моделей. Это объясняется тем, что шероховатость поверхности не подчиняется данным законам распределения, что было доказано в статье при помощи статистической проверки гипотез о законе распределения на основе оценки критериев согласия. Выходом из данной ситуации является использование закона распределения Накагами для генерации случайных данных, которые в дальнейшем используются для построения фрактальной кривой шероховатости поверхности. Для оценки точности получаемых результатов произведено моделирование профилей с исходными параметрами, которые были определены по реальным объектам, взятым с реальных профилограмм. Применение указанного выше закона распределения, с одной стороны, дает возможность обеспечить требуемую точность модели (погрешность моделирования по высотным и шаговым параметрам шероховатости не превышает 8%), а с другой – повышает универсальность модели, т.к. не требуется корректировка алгоритма под каждый характер микрорельефа. Разработанный инструментальный универсален и применим при моделировании микропрофилей различных шероховатых объектов в многообразных областях практики моделирования.

Ключевые слова: шероховатость, моделирование, точность, закон распределения, критерии согласия

HIGH ACCURACY OF MODELING SURFACE ROUGHNESS PROFILES WITH REGULAR MICRORELIEF

¹Kuznetsova E.M., ²Ovsiannikov V.E., ²Nekrasov R.Yu., ²Putilova U.S.

¹Kurgan state university, Kurgan, e-mail: app@kgsu.ru;

²Tyumen industrial university, Tyumen, e-mail: vik9800@mail.ru

This article discusses the issues of improving the accuracy of surface roughness profile modeling in case of regular microrelief character. As initial data for consideration, surfaces treated with finishing turning and diamond smoothing with rigid fixation of the indenter are taken. The surface roughness model is based on the use of the methodological apparatus of fractal geometry. The construction of the model is based on the use of a random addition algorithm. The source data is the fractal dimension of the profile and the distribution law parameters. It is shown that the use of traditional laws of distribution of random variables: normal (Gauss), Rayleigh and Weibul does not allow obtaining the required accuracy of models. This is due to the fact that surface roughness does not obey these distribution laws, which was proved in the article by statistical testing of hypotheses about the distribution law based on an assessment of consent criteria. The way out of this situation is to use the Nakagami distribution law to generate random data, which is later used to build a fractal surface roughness curve. To assess the accuracy of the results obtained, profiles were modeled with initial parameters that were determined from real objects taken from real profilograms. The use of the above distribution law on the one hand makes it possible to ensure the required accuracy of the model (the modeling error by altitude and step roughness parameters does not exceed 8%), and on the other hand increases the versatility of the model, since no algorithm adjustment is required for each microrelief character. The developed tools are universal and applicable in modeling microprofiles of various rough objects in various areas of modeling practice.

Keywords: roughness, modeling, accuracy, distribution law, acceptance criteria

Шероховатость поверхности является нормированным показателем и наиболее часто применяемой характеристикой качества поверхности. В большинстве случаев по шероховатости поверхности в конструкторских и технологических документах проставляется требование только к высотным параметрам шероховатости: либо среднеарифметическое отклонение профиля (R_a , мкм), либо шероховатость по 10 точкам (R_z , мкм). Однако данные величины

далеко не полностью характеризуют профиль поверхности. В целом следует сказать, что проблема описания шероховатости поверхности на сегодняшний день полностью не решена. Принципиально для решения этой задачи используются два подхода. Первый подход можно назвать параметрическим [1]. Он предполагает, что описание шероховатости поверхности реализуется за счет использования некоторой системы числовых параметров. Второй подход [2]

для того, чтобы характеризовать профиль шероховатости поверхности по таким категориям, как распределение тангенсов углов наклона боковых сторон профиля, функция распределения высот профиля, функция, которая описывает опорную кривую, и т.д.

Наиболее широко в отечественной практике применяется оценка шероховатости поверхности с использованием параметров, которые регламентированы ГОСТ 2789. Данный нормативный документ предполагает использование как высотных параметров (R_a , R_z , R_{max}), так и шаговых (S , Sm) и опорных (tp). Кроме того, в стандарте предусмотрена возможность указания особенностей геометрии профиля (например, направление неровностей). Однако возможна только качественная оценка данных аспектов профиля.

ИСО 4281/1-1984 – Международный стандарт, который расширяет набор параметров для оценки шероховатости поверхности, прописывая не только масштабные факторы, но и количественные параметры формы и расположения неровностей. Для этих целей используются величины среднеарифметического наклона неровностей Δ_a и среднеквадратического наклона неровностей Δ_q . Данные параметры определяются по следующим расчетным зависимостям:

$$\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left(\frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right)^2}$$

$$\Delta_a = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \right|,$$

где x , y – соответственно абсцисса и ордината точек на кривой профилограммы поверхности.

В целом можно сказать, что на сегодняшний день используется более 50 параметров для характеристики шероховатости поверхности. Общим недостатком параметрического подхода к описанию шероховатости поверхности является то, что ни одна система параметров не дает исчерпывающего описания профиля и, кроме того, параметрический подход неприменим при решении ряда задач по конструированию (например, исследования герметичности, контактного взаимодействия и т.д.).

Исследования в части описания шероховатости поверхности посредством непараметрического подхода были выполнены в работах В.Э. Завистовского и С.Э. Завистовского [3]. При этом делалось допущение, что высотные значения микропрофиля имеют подчинение нормальному закону рас-

пределения. Дальнейшее развитие данный подход получил в работах научной школы под руководством Ю.Р. Виттенберга [4], где для характеристики шероховатости поверхности были использованы корреляционные функции. При этом параметры шероховатости можно получить из соотношений вида:

$$R_a = \sqrt{\frac{2}{\pi} \times K(0)}$$

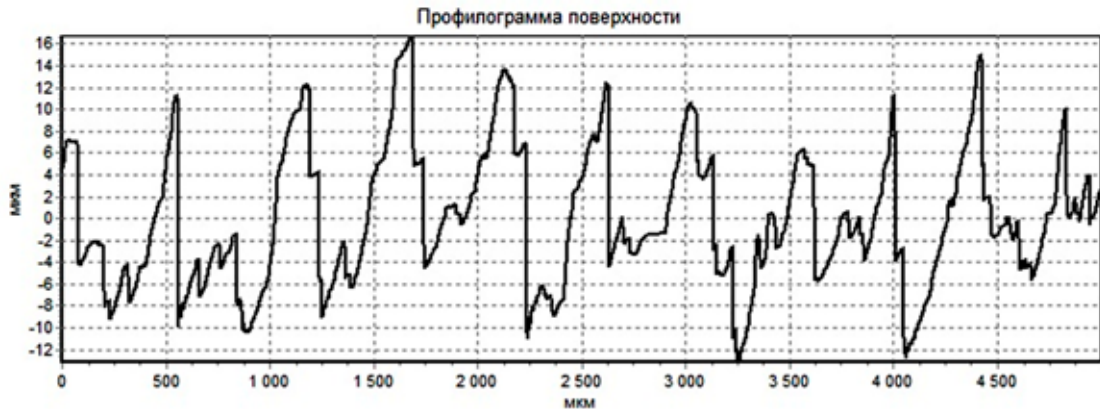
$$R_q = \sqrt{K(0)}$$

где $K(0)$ – значение автокорреляционной функции профиля в нулевой точке.

Моделям, которые приведены выше, присущи те же недостатки, что и параметрическому подходу. В работах научной школы И.В. Крагельского, Н.Б. Демкина и др. [5] шероховатость поверхности рассматривается как совокупность геометрических примитивов. Такой подход позволил решать задачи оценки исследования эксплуатационных свойств поверхностей. Однако недостатком подхода является то, что кривая профиля является детерминированной, и не учитываются структурные свойства профиля.

В последнее время все большее распространение при моделировании геометрических объектов получает фрактальная геометрия. Применению теории фракталов при моделировании профилей и поверхностей деталей посвящены исследования [6; 7]. Весьма неплохие результаты при моделировании шероховатости поверхности дает метод случайных сложений [7]. Однако в работе [7] показано, что использование нормального распределения в чистом виде не позволяет обеспечить требуемую точность. Поэтому в работе [7] была произведена корректировка алгоритма, которая фактически заключалась в подгонке закона под реальные профили поверхностей. Недостатком такого решения является то, что оно не универсально и требует индивидуального подхода применительно к каждому конкретному случаю. Например, результаты, полученные в работе [7], справедливы только для поверхностей, обработанных чистовым точением. Поэтому необходимо провести исследования и подобрать закон распределения, которому подчиняются высоты шероховатости поверхностей с регулярным профилем, которые обработаны разными методами (точением и выглаживанием).

Цель исследования: повышение точности моделирования шероховатости поверхностей с регулярным профилем за счет модернизации алгоритма построения фрактальной кривой.



Pa (мкм) = 5.064; Sm (мм) = 0.167; tcr (%) = 44.0; Rmax (мкм) = 27.920; Rp (мкм) = 15.875; S (мм) = 0.072; Xш = 0.06892
Отсечка шага = 2,5 мм; кол-во базовых длин = 2; диапазон = 3,2 - 12,5 мкм; общее количество точек = 3100

Рис. 1. Профилограмма поверхности

Материал и методы исследования

В качестве исходных данных были использованы значения высот профилей шероховатости поверхностей, обработанных на токарном станке чистовым точением и алмазным выглаживанием. Измерение шероховатости поверхностей осуществлялось при помощи профилометра-профилографа марки «Абрис ПМ-7». Пример профилограммы обработанной поверхности приведен на рисунке 1.

Полученные значения координат профиля были использованы в качестве исходных данных для проверки гипотезы о соответствии закону распределения. Проверялись следующие законы.

1. Нормальный закон распределения, параметры которого определяются по известным зависимостям [8]:

$$\varphi(x, a, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}},$$

где a, σ – параметры закона распределения.

2. Закон распределения Вейбула [8]:

$$\varphi(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{x}{a}\right)^b},$$

где a, b – параметры закона распределения.

3. Закон распределения Рэлея [8]:

$$\varphi(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), & x > 0 \end{cases}$$

4. Закон распределения Накагами [8]:

$$\varphi(x) = \frac{2}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\Omega}\right)^m x^{2m-1} \exp(-mx^2/\Omega),$$

где $\Gamma(m)$ – гамма-функция; m, Ω – параметры закона распределения.

При этом параметр m можно получить из следующего выражения:

$$m = 1 + \gamma^4 / (1 + 2\gamma^2) = 1 + (\alpha_p^2 / 2\sigma_B^2)^2 / (1 + \alpha_p^2 / 2\sigma_B^2),$$

где $\gamma^2 = \alpha_p^2 / 2\sigma_B^2$ – параметр, который отражает соотношение детерминированной (σ_p) и стохастической (σ_θ) составляющих.

При этом значения σ_B и σ_p можно получить на основе корреляционного анализа профилограмм поверхностей и определения реализации автокорреляционной функции $K_{xx}(t)$. Выражения для вычисления составляющих корреляционной функции имеют вид [7]:

$$K_\beta(\tau) \cong \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n A_i^2 \cos \omega_i \tau$$

$$K_p(\tau) = \frac{1}{l-\tau} \int_0^{l-\tau} y_\gamma(t) y_\gamma(t+\tau) dt$$

Параметры σ_B и σ_p соответствуют значениям $K_\beta(0)$ и $K_p(0)$.

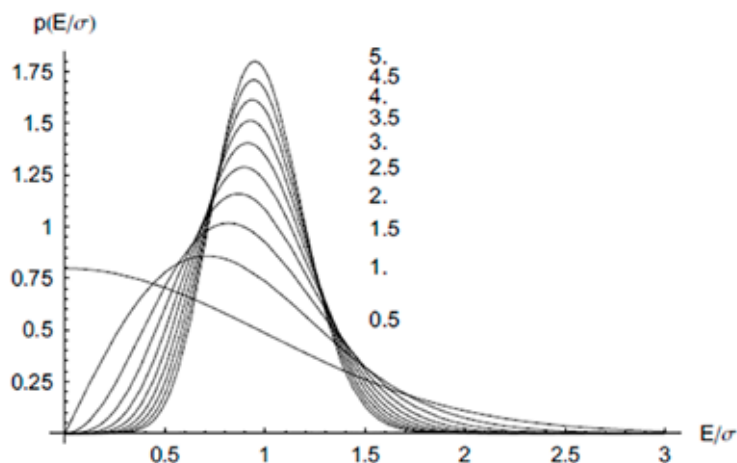


Рис. 2. Зависимость формы кривой закона распределения Накагами от параметра m

При этом можно отметить, что закон распределения Накагами обладает важным свойством: при изменении параметра m он переходит в нормальный (рис. 2).

Проверка соответствия закона распределения осуществлялась по критерию Колмогорова – Смирнова [8].

Построение фрактальной модели шероховатости поверхности осуществлялось на основе использования метода случайных сложений [7]. При этом укрупненно последовательность вычислений выглядит следующим образом.

1. В качестве начальных значений абсцисс профиля принимаются величины $x_i = 0; 0.5; 1$.

2. Начальные значения ординат в данных точках принимаются нулевыми.

3. Генерируются значения ординат и прибавляются к исходным. При этом по умолчанию используется генератор с распределением Гаусса.

4. Полученные значения ординат усредняются согласно зависимости вида:

$$y\left(\frac{x_{i+(i+1)}}{2}\right) = \frac{y(x_i) + y(x_{i+1})}{2}$$

5. Осуществляется корректировка параметров рассеяния:

$$\sigma_{i+1}^2 = \left(\frac{1}{2}\right)^{2H} \times \sigma_i^2,$$

где H – эмпирический показатель Херста. В данном случае показатель Херста является оценкой величины фрактальной размерности D , т.к. данные величины между собой связаны выражениями вида:

- для плоских объектов: $D = 2 - H$;
- для объемных объектов: $D = 2 - H$.

6. Определяются новые значения абсцисс посредством усреднения предыдущих значений.

Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке 3 приведены примеры расчетов параметров законов распределения.

Аналогичным образом строились кривые распределения и для других рассматриваемых законов. Ввиду отсутствия закона распределения Накагами в стандартных пакетах статистического анализа, расчеты проводились в авторской компьютерной программе. В результате статистической обработки более 150 профилограмм поверхностей было установлено, что, по критерию согласия Колмогорова – Смирнова, шероховатость поверхности соответствует закону распределения Накагами и не соответствует трем другим рассматриваемым. Был реализован генератор ординат фрактальной модели профиля на основе закона распределения Накагами. На рисунке 4 приведены примеры смоделированных двухмерного профиля и трехмерной шероховатой поверхности.

Для оценки точности получаемых результатов производилось моделирование профилей с исходными параметрами, которые были определены по реальным объектам (взяты с реальных профилограмм). Затем по полученным фрактальным кривым определялись параметры шероховатости поверхности в соответствии с ГОСТ 2789.

На рисунке 5 приведен пример результатов определения параметров по ГОСТ 2789 для реальных профилей, моделей, построенных с использованием генератора ординат профиля на основе закона распределения Гаусса (нормального) и закона распределения Накагами.

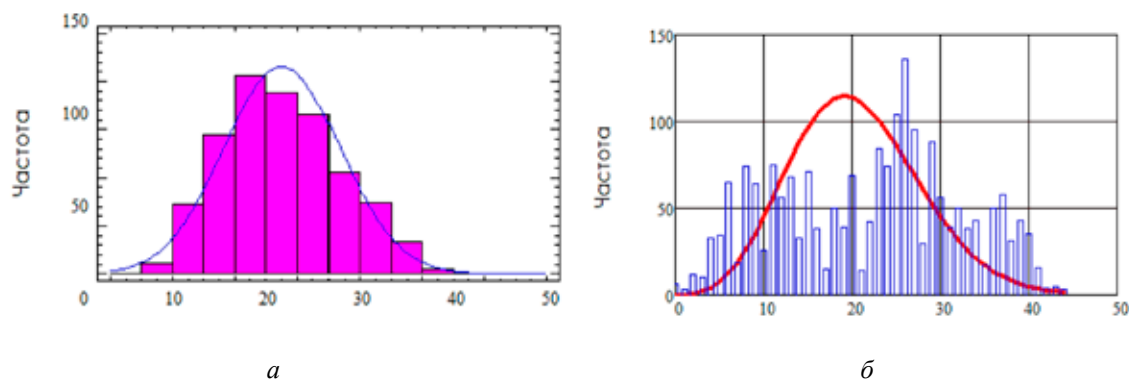


Рис. 3. Результаты расчетов: а – нормальное распределение; б – распределение Накагами

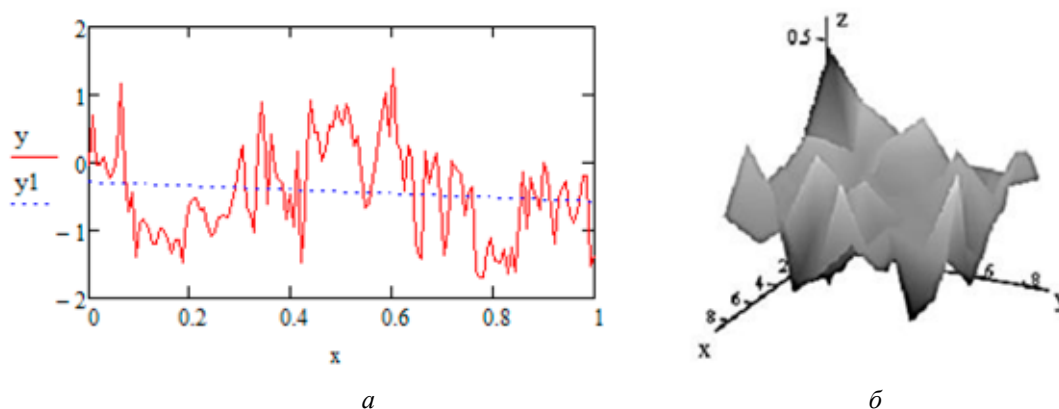


Рис. 4. Пример результатов моделирования:
а – фрактальная кривая профиля шероховатости; б – поверхность

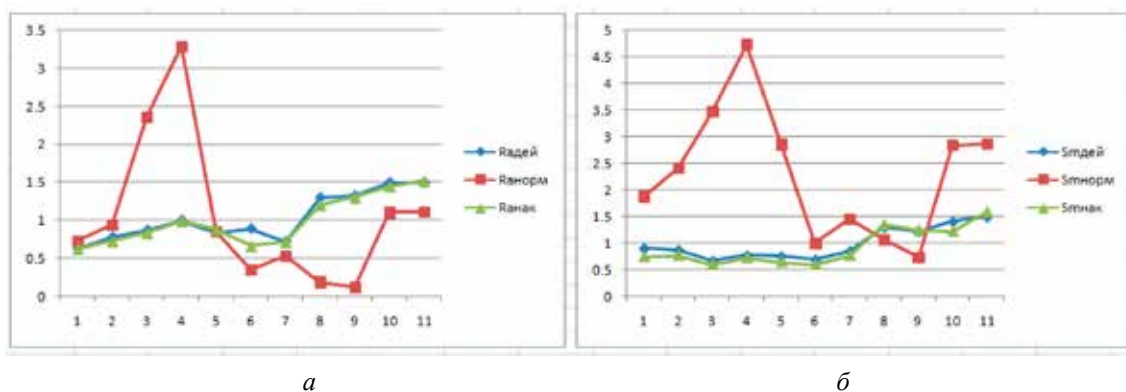


Рис. 5. Пример точности моделей:
а – значения R_a для реальных профилей и модели; б – то же для S_m

Как можно видеть из рисунка 5, использование генератора ординат профиля на основе закона распределения Гаусса дает значительную погрешность (более 25%). Генератор ординат на основе закона распределения Накагами позволяет получать погрешность, не превышающую 10%, что вполне достаточно для решения как за-

дач описания шероховатости поверхности, так и при решении прикладных задач, связанных с исследованием эксплуатационных свойств.

Заклучение

В результате статистического анализа профилограмм поверхностей, имеющих ре-

гулярный микропрофиль, доказано, что их ординаты подчиняются закону распределения Накагами. Реализация генератора ординат профиля на основе использования закона распределения Накагами позволяет получать фрактальные модели шероховатости поверхностей с погрешностью, которая не превышает 10%. Важным преимуществом является универсальность генератора в части моделирования профилей и трехмерных поверхностей деталей, которые обработаны чистовым точением и алмазным выглаживанием с жестким закреплением индентора без применения окон сглаживания [7]. Совместное использование фрактальной геометрии и закона распределения Накагами позволяет учесть как структурные особенности текстуры профиля (через значения фрактальной размерности), так и технологические аспекты ее формирования (через соотношение детерминированной и случайной составляющей).

Применение разработанной модели принципиально возможно при решении задач, не связанных с теми, которые рассматривались в данной статье. В частности, при помощи разработанного инструментария можно моделировать микропрофили дорог [9; 10] и других шероховатых объектов в разных областях практики моделирования.

Список литературы

1. Приходько В.М., Медеяев И.А., Фатюхин Д.С. Формирование эксплуатационных свойств деталей машин ультразвуковыми методами: монография. М.: МАДИ, 2015. 264 с.
2. Tomov M., Kuzinovski M., Cichosz P. Development of mathematical models for surface roughness parameter prediction in turning depending on the process condition. *Int. J. Mech*, 2016. № 113. P. 120–132.
3. Шаповалов В.В., Эрекнов А.Ч., Кохановский В.А. Триботехника: учебник. М.: Феникс, 2017. 351 с.
4. Конакова И.П., Пирогова И.И. Шероховатости поверхностей и их практическое применение в программе КОМПАС: учебное пособие. Екатеринбург: изд-во УрФУ, 2014. 104 с.
5. Шец С.П., Сакало В.И., Суслон А.Г. Взаимосвязь герметичности подшипниковых узлов трения с абразивным изнашиванием их трибосопряжений // *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2016. № 2 (50). С. 36-40.
6. Огар П.М., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Механика контактирования шероховатых поверхностей. Братск: БрГУ, 2016. 282 с.
7. Овсянников В.Е. Применение вейвлет-анализа для оценки параметров качества поверхностного слоя деталей машин // *Вестник КузГТУ*. 2014. №2. С. 56-57.
8. Плескунов М.А., Корчёмкина Л.В. Теория вероятностей: справочник. Екатеринбург, 2017. 136 с.
9. Корчагин П.А., Летопольский А.Б., Тетерина И.А. Результаты исследования работоспособности бокового рабочего оборудования автогрейдера // *Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета*. 2018. Т. 15. № 4(62). С. 492-501.
10. Тетерина И.А., Корчагин П.А. Исследование влияния эксплуатационных параметров коммунальной машины на вибронегруженность рабочего места оператора // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6. № 1. С. 128-135.