

УДК 621.9

DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-28-33

А.А. Трошин, О.В. Захаров

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕРЕНИЯ ШЕРОХОВАТОСТИ СФЕРИЧЕСКИМ ЩУПОМ

Обоснована целесообразность применения координатно-измерительных машин, у которых измерительный щуп имеет сферический наконечник. Представлена математическая модель плоского контакта сферического щупа и шероховатой поверхности. Исследовано влияние радиуса сферического щупа на параметры шероховатости Ra , $Rmax$,

Rq . Установлено, что удовлетворительные результаты обеспечивает использование сферического щупа радиусом 5-50 мкм.

Ключевые слова: измерение шероховатости, математическая модель, координатно-измерительная машина, КИМ, профилометр, сферический щуп.

А.А. Troshin, O.V. Zakharov

SIMULATOR FOR ROUGHNESS MEASUREMENT WITH SPHERICAL PROBE

A measurement of surface roughness is commonly carried out with the aid of profilometers, but when measuring the roughness of a curved surface arise difficulties. A technical problem consists in a probe feed along the normal to a nominal surface and filtration followed to exclude a low-frequency constituent of a profile.

That is why it is purposeful to use coordinate measuring machines which have a probe with a spherical tip. For the first time there is presented a simulator of a spherical probe flat contact and surface roughness. A contact model developed is based on the regulations of analytical geometry. With the use of a numerical algorithm one finds a contact point and the

center of a probe circle. On the basis of the simulator there is carried out an investigation of the impact of a probe radius upon roughness parameters Ra , $Rmax$, Rq . As initial data were used measurement results of the profilometer and profiles modeled with the aid of Monte-Carlo statistical method. It is defined that with the increase of the radius of the spherical probe its penetrating capacity decreases. That is why height parameters of roughness are distorted. The application of the spherical probe with the radius of 5-50 mkm ensures satisfactory results.

Key words: roughness measurement, simulator, coordinate measuring machine, CMM, profilometer, spherical probe.

Введение

Традиционно для измерения шероховатости используют профилометры [1; 2]. Щуп профилометра, как правило, представляет собой конус с углом 90° и радиусом при вершине 2, 5 или 10 мкм. Геометрические размеры щупа создают первый источник погрешностей при измерении шероховатости. Относительно мелкие или узкие элементы поверхности будут не полностью измерены и искажены. В этом случае щуп осуществляет механическую высокочастотную фильтрацию микронеровностей. Уменьшение угла конуса или радиуса при его вершине приводит к увеличению контактного давления, что, в свою очередь, может вызвать заклинивание щупа или царапание измеряемой поверхности.

Измерение шероховатости на сложных криволинейных поверхностях, а также

труднодоступных участках, например в отверстиях малого диаметра, с помощью профилометров затруднительно [3-5]. Вместе с тем такая задача достаточно часто встречается на практике [6-11]. Тогда целесообразным становится применение координатно-измерительных машин (КИМ). Современные КИМ в большинстве случаев оснащают сферическими щупами диаметром 0,1, 2, 8 мм. С увеличением диаметра щупа увеличивается производительность контроля при прочих равных условиях. Наименьшее из известных значений радиуса сферы наконечника 0,03-0,01 мм имеется у КИМ фирмы «Лапик» - единственного отечественного производителя координатно-измерительных машин. Также КИМ имеет большую дискретность отсчета - 5 мкм, в то время как у профилометра она обычно составляет 0,5 мкм. По-

лучение шага менее 5 мкм возможно, но требует большего времени при контактном способе. Использование сканирующих датчиков контакта позволяет многократно увеличить число измеренных точек, но при этом увеличивается погрешность. Таким образом, специфика измерения шероховатости с применением КИМ обуславливает необходимость оценки влияния радиуса щупа на параметры шероховатости. Для этого необходима математическая модель контакта сферического щупа и шероховатой поверхности.

Постановка задачи

Для аналитического описания измерения на КИМ требуется решение нескольких последовательных и взаимосвязанных задач: компенсация радиуса сферического щупа, выравнивание систем координат КИМ и детали, фильтрация результатов и исключение грубых ошибок. Компенсация радиуса сферического щупа позволяет получить координаты точек касания с поверхностью на основе координат центра щупа. Выравнивание систем координат исключает из рассмотрения номинальный профиль, что важно для криволинейных поверхностей. Фильтрация призвана отсечь шум (вибрации), а также выявить дефекты поверхности.

Одной из важных задач при измерении шероховатости является обоснование выбора метода фильтрации. Традиционно применяют три типа фильтров, имеющих одну передаточную функцию, но разные длины отсечки (ISO 16610-1:2006): 2RC - линейный Гаусса; 2RC PC - линейный

Гаусса с коррекцией фазы; фильтр двойной фильтрации Гаусса - фильтр подавления впадин. Для КИМ, в отличие от профилометров, не делают аппаратную фильтрацию, поэтому данный вопрос остается актуальным. Вопросы фильтрации изложены в работах [12; 13].

Таким образом, при измерении шероховатости на КИМ актуальной будет задача определения влияния радиуса щупа на параметры шероховатости. Для этого необходимо разработать математическую модель контакта щупа и измеряемой поверхности. Указанная задача в известной литературе описана только с эвристической точки зрения [1]. Попытка аналитического описания была предложена в работе [14]. В настоящей статье представлено развитие аналитической модели и приведены результаты математического моделирования на основе реальных данных и с использованием метода Монте-Карло.

Математическая модель измерения

Математическая модель плоского контакта сферического щупа и шероховатой поверхности построена на положениях аналитической геометрии. Расчетная схема приведена на рис. 1. В качестве исходных данных выступают: исходный профиль по-

верхности в виде координат (x_i, y_i) , радиус r сферического щупа, дискретность Δx_j перемещения щупа вдоль измеряемого профиля.

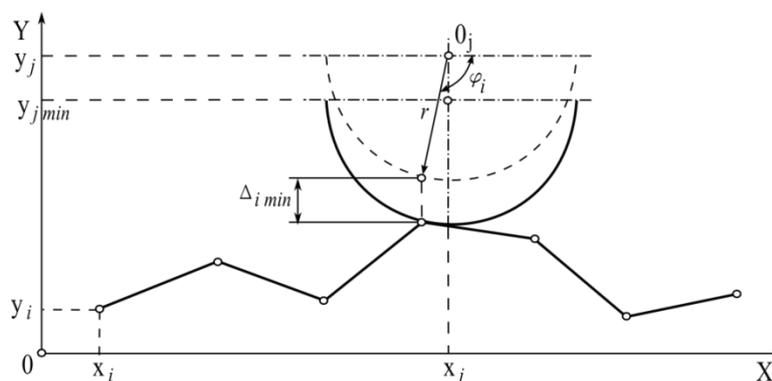


Рис. 1. Расчетная схема измерения шероховатости

Исходные допущения модели:

- профиль шероховатой поверхности задан дискретно, так как аналитическое описание отсутствует;
- погрешность формы и расположения поверхности исключена до рассмотрения шероховатости;
- центр сферы щупа рассматривается в плоскости профиля измеряемой поверхности, поэтому его сечение представляет собой окружность с радиусом, равным радиусу сферы;
- направление подвода щупа совпадает с направлением координатной оси Y ;
- радиус щупа больше, чем дискретность Δx_j перемещения, поэтому контакт осуществляется только в точках x_i ;
- фильтрация шероховатости выполняется стандартными методами.

Аналитическое описание процесса измерения сводится к следующему. Сферический щуп (окружность в сечении) перемещается по оси из некоторого исходного положения y_j , заведомо с зазором до поверхности, до касания с точкой поверхности. Касание находится в результате расчета минимального зазора между окружностью щупа и всеми точками поверхности в пределах диаметра щупа. Для этого решается параметрическое уравнение окружности, приравненное к x_i , относительно угла φ_i . После этого центр окружности O_j смещается в направлении поверхности на величину $\Delta_{i \min}$.

Схема алгоритма расчета представлена на рис. 2. Точка касания окружности щупа и профиля находится численным методом, исходя из минимума начального зазора $\Delta_{i \min}$.

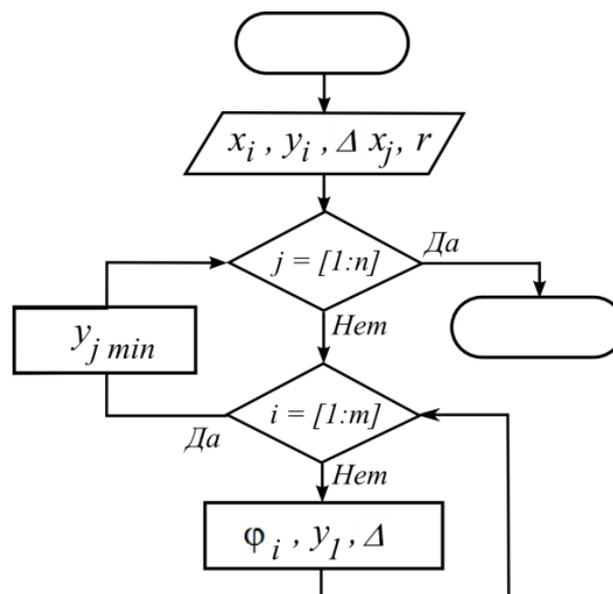


Рис. 2. Схема алгоритма моделирования измерения шероховатости

Организуется два вложенных цикла: по j от 1 до n и по i от 1 до m , где m - число точек измеряемого профиля, n - число положений щупа при измерении. В общем случае числа n и m не равны, но для последующего моделирования они приняты равными. В первом цикле моделируется перемещение щупа по длине измерения по дискретно заданным координатам x_j, y_j . Вертикальное положение $y_j \min$ соответ-

ствует минимальному расстоянию $x_i \min$ между окружностью щупа и дискретно заданным профилем поверхности. Во втором (внутреннем) цикле определяются расстояния от всех точек профиля до окружности в пределах от $x_j - r$ до $x_j + r$. Затем из этих расстояний выбирается минимальное значение $x_i \min$. Предполагается, что именно эта точка станет точкой контакта при вертикальном перемещении щупа.

Моделирование измерения шероховатости

На основе разработанных математической модели контакта щупа и шероховатой поверхности и программы расчета выполнены тестовые примеры для предварительно измеренной на профилометре поверхности. Для получения статистически достоверных данных проведено моделирование измерения 100 профилей, получен-

ных по методу Монте-Карло по аналогии с работой [10]. Исследовались параметры шероховатости: среднеарифметическое отклонение профиля Ra , наибольшая высота профиля $Rmax$, среднеквадратичное отклонение профиля Rq . Усредненные данные по результатам моделирования приведены в таблице.

Таблица

Измеренные параметры шероховатости в зависимости от радиуса щупа

Параметры шероховатости	Радиус щупа, мкм			
	5	20	50	100
Ra , мкм	0,86	0,84	0,80	0,78
$Rmax$, мкм	1,54	1,54	1,40	1,34
Rq , мкм ²	0,69	0,68	0,67	0,63

Пример на рис. 3 иллюстрирует моделирование измерения шероховатости поверхности с различными радиусами сферического щупа (5, 20 и 100 мкм). Дискретность отсчета по оси X составляла 5

мкм, дискретность отсчета по оси Y - 0,1 мкм. Из профиля предварительно была исключена постоянная составляющая на основе фильтрации Гаусса.

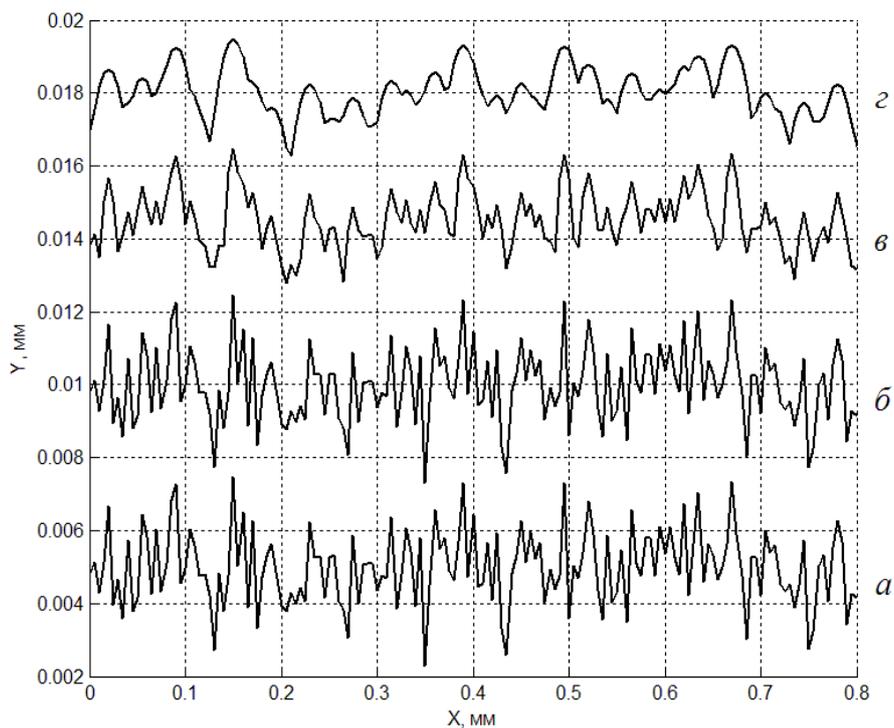


Рис. 3. Моделирование измерения шероховатости сферическим щупом:
а - исходный профиль; б - радиус 5 мкм; в - радиус 20 мкм; г - радиус 100 мкм

Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением радиуса сферического щупа уменьшается его проникающая способность. Поэтому происходит недоощупывание профиля, что уменьшает

получаемые значения Ra , $Rmax$, Rq на 10-20 %. Шаговые параметры профиля, например средний шаг неровностей Sm , искажаются незначительно.

Заключение

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что измерение шероховатости с применением координатно-

измерительных машин дает положительный результат при использовании сферических щупов диаметром 0,01-0,03 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайтхауз Д. Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. М.: Интеллект, 2009. 472 с.
2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.
3. Фомин А.А. Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 12. С. 27-29.
4. Шрубченко И.В. Определение характеристик пятна контакта поверхностей качения опор технологических барабанов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 2. С. 4-6.
5. Печенин В.А., Болотов М.А., Рузанов Н.В. [и др.]. Модель сопряжения деталей по плоскоцилиндрическим поверхностям // СТИН. 2017. № 3. С. 22-28.
6. Демьяненко Е.Г. Исследование способа формообразования деталей бочкообразной формы // Авиационная техника. 2014. № 2. С. 72-76.
7. Захаров О.В., Погораздов В.В. Проектирование формообразующих систем бесцентровых суперфинишных станков. Саратов: СГТУ, 2004. 140 с.
8. Захаров О.В. Бесцентровое шлифование конических поверхностей на станках с продольной подачей // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 7. С. 14-16.
9. Захаров О.В. Наладка бесцентровых суперфинишных станков на основе численного моделирования и оптимизации // Вестник машиностроения. 2003. № 12. С. 48-50.
10. Захаров О.В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 32-35.
11. Королев А.В., Балаев А.Ф., Яковишин А.С. Обеспечение качества подшипников качения на основе применения технологии многоциклового нагружения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 7. С. 291-293.
12. Печенин В.А., Болотов М.А., Степанова Е.Р. Использование билатерального фильтра для оценки и анализа отклонений геометрии поверхностей // Информационные технологии и нанотехнологии: сб. тр. конф. Самара, 2016. С. 447-452.
13. Марков Б.Н., Меликова О.Н., Шулёпов А.В. Алгоритм построения морфологического дискового фильтра для анализа шероховатости поверхности // Измерительная техника. 2017. № 5. С. 30-33.
14. Королева А.А., Захаров О.В. Оценка проникающей способности сферического щупа при измерении шероховатости // Инновационные технологии в металлообработке: сб. тр. всерос. науч.-практ. конф. Ульяновск: УГТУ, 2019. С. 351-355.
1. Whitehouse D. Surface Metrology. Principles, Industrial Methods and Devices. M.: Intellect, 2009. pp. 472. c.
2. Tabenkin A.N., Tarasov S.B., Stepanov S.N. Roughness, Rippling, Profile. International Experience. S-Pb.: Publishing House of Polytechnic University, 2007. pp. 136.
3. Fomin A.A. Support of surface micro-geometry during machining workpieces with heterogeneous properties // Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument Making. 2012. No.12. pp. 27-29.
4. Shrubchenko I.V. Characteristic definition of contact patch in roller bearing surfaces of technological drums // Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument Making. 2007. No.2. pp. 4-6.
5. Pechenin V.A., Bolotov M.A., Ruzanov N.V. [et al.]. Model of Parts Mating on Flat-Cylindrical Surfaces // STIN. 2017. No.3. pp. 22-28.
6. Demiyanko E.G. Investigation of method for barrel parts shaping // Aeronautical Engineering. 2014. No.2. pp. 72-76.
7. Zakharov O.V., Pogorazdov V.V. Design of Shaping Systems in Centerless Super-Finishing Machines. Saratov: SSTU, 2004. pp. 140.
8. Zakharov O.V. Cone centerless grinding on machines with line feed // Automation and Modern Technologies. 2006. No.7. pp. 14-16.
9. Zakharov O.V., Setting of centerless super-finishing machines based on numerical modeling and optimization // Bulletin of Mechanical Engineering. 2003. No.12. pp. 48-50.
10. Zakharov O.V. Centerless finishing accuracy control with statistical methods // Mechatronics, Automation, Control. 2009. No.9. pp. 32-35.
11. Korolyov A.V., Balaev A.F., Yakovishin A.S. Assurance of roller bearing quality based on application of multi-cycle loading technology // Assemblage in Mechanical Engineering, Instrument Making. 2017. No.7. pp. 291-293.
12. Pechenin V.A., Bolotov M.A., Stepanova E.R. Bilateral filter use for estimate and analysis of surface geometry deviation // Information Technologies and Nano-Technologies: Proceeding of the Conf. Samara, 2016. pp. 447-452.
13. Markov B.N., Melikova O.N., Shulepov A.V. Algorithm for formation of morphological disk filter for

analysis of surface roughness // Measurement Equipment. 2017. No.5. pp. 30-33.
14. Korolyova A.A., Zakharov O.V. Penetrability estimate of spherical probe at roughness measurement

// Innovation Technologies in Metalworking: Proceedings of All-Russian Scientif.-Pract. Conf. Ulyanovsk: USTU, 2019. pp. 351-355.

Ссылка для цитирования:

Трошин А.А., Захаров О.В. Математическая модель измерения шероховатости сферическим щупом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2020. № 2. С. 28 –33. DOI: 10.30987/1999-8775-2020-2020-2-28-33.

Статья поступила в редакцию 30.11.19.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Хандожко А.В.,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Статья принята к публикации 29. 01. 20.

Сведения об авторах:

Трошин Андрей Александрович, аспирант кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета, e-mail: andreycuardian64@gmail.com.

Troshin Andrey Alexandrovich, Post graduate student of the Dep. “Technology and Control Systems in Mechanical Engineering”, Saratov State Technical University, e-mail: andreycuardian64@gmail.com.

Захаров Олег Владимирович, д.т.н., профессор кафедры «Технология и системы управления в машиностроении» Саратовского государственного технического университета, e-mail: zov20@mail.ru.

Zakharov Oleg Vladimirovich, Dr. Sc. Tech., Prof. of the Dep. “Technology and Control Systems in Mechanical Engineering”, Saratov State Technical University, e-mail: zov20@mail.ru.