

ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ КОНКРЕТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВОЙСТВ

В. А. ВАЛЕТОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: valetov.v@mail.ru*

Обоснована целесообразность оптимизации микрогеометрии поверхностей для обеспечения их конкретных функциональных свойств, приведены условия выполнения этой оптимизации. Представлены методы решения основных задач реальной оптимизации, позволяющей существенно улучшить качество изготавливаемой продукции. На конкретных примерах показана практическая невозможность оптимизации микрогеометрии на базе параметрических критериев ее оценки и контроля, обусловленная необходимостью использования большого количества параметров для точного описания каждой обрабатываемой поверхности, без которого найденную каким-либо образом наилучшую из возможных микрогеометрию невозможно повторить на серийной продукции. Разработана методика поиска оптимальной, а практически — наилучшей из возможных, микрогеометрии для конкретного свойства поверхности. Приведены также методики технологического обеспечения найденной наилучшей микрогеометрии и быстрого, надежного и малозатратного контроля реализованной микрогеометрии обработанной поверхности в изготовленной детали. Для контроля микрогеометрии с помощью графических критериев разработаны программы с использованием профилей и микро топографий поверхностей, которые зарегистрированы в Реестре программ для ЭВМ. Разработана методика фильтрации первичной информации с помощью амплитудного спектра, или методика определения базовой длины профилей при использовании графических критериев. Приведены примеры практического использования разработанных методик и программ и продемонстрирована их эффективность.

***Ключевые слова:** точное описание микрогеометрии, нормирование микрогеометрии, технологическое обеспечение оптимальной микрогеометрии, контроль полученной микрогеометрии, графические критерии оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей.*

Введение. Повышение качества выпускаемой продукции является важнейшей задачей промышленности, особенно актуальной для приборо- и машиностроения.

Общепризнанно, что работу любого изделия в основном определяют точность размеров, формы и взаимного расположения сопрягаемых поверхностей деталей, а также состояние их поверхностного слоя. Влияние геометрических характеристик, свойств конструкционных материалов и их химического состава, а также многих других факторов в определенной степени изучено. Например, известно, что качество изделий существенно зависит от материалов, из которых они сделаны. Природные конструкционные материалы давно найдены, исследованы и успешно используются по назначению. Трудно предположить, что на Земле обнаружат новый материал, сопоставимый по количеству с железом и превосходящий его по качеству. Многочисленные искусственные материалы, как правило, значительно дороже естественных

(природных). Также давно установлено, что качество изделий сильно зависит от геометрической точности их изготовления и сборки. В мировой практике возможности повышения качества изделий за счет увеличения этой точности почти исчерпаны и связаны со значительным ростом затрат (рис. 1).

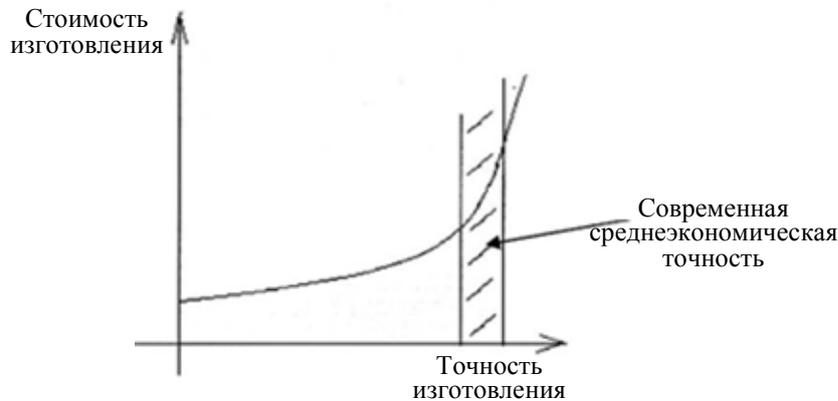


Рис. 1

Наименее исследованными остаются проблемы, связанные с оптимизацией микрогеометрии поверхностей и обеспечением простого, надежного и дешевого ее контроля, например [1—3], поэтому создание оптимального микрорельефа функциональных поверхностей деталей наряду с улучшением других характеристик поверхностного слоя, относятся к наиболее эффективному резерву значительного повышения качества изделий.

Отечественные и зарубежные исследования микрогеометрии поверхностей направлены в основном на решение задач с помощью параметрического описания профиля или поверхности. Большая часть исследований базируется на стандартных критериях, которые определяют лишь отдельные характеристики отклонений реальных поверхностей от идеальных [4—17].

В большинстве стран мира стандарты на микрогеометрию поверхности деталей построены на использовании профилей поверхностей, т.е. сечений поверхности плоскостью, при ее оценке и контроле. Для этих целей применяются приборы так называемого ощупывающего типа, оснащенные в основном индукционными датчиками. Многочисленные семейства этих приборов различаются габаритами, количеством вычисляемых параметров, стоимостью и т.п., но все они работают по принципу „ощупывания“ контролируемой поверхности алмазной иглой индукционного датчик. При протаскивании по поверхности игла повторяет выступы и впадины последней. Полученный таким образом профиль обрабатывается по соответствующей программе, в результате чего определяются значения различных параметров профиля и некоторые результаты его статистической обработки в графическом изображении. В последнее время появляется все больше так называемых бесконтактных приборов, позволяющих фиксировать микро топографию поверхности, но эти приборы вычисляют те же параметры, только относящиеся не к профилю, а к микро топографии поверхности.

Как известно, реальное решение задачи оптимизации микрогеометрии (т.е. нахождения наилучшей из возможных) требует выполнения следующих условий:

- оптимальную для конкретного функционального свойства микрогеометрию поверхности нужно знать, точно описать и нормировать, т.е. задать при изготовлении изделия;
- заданную оптимальную микрогеометрию нужно технологически обеспечить, т.е. знать, как ее реализовать;
- полученную микрогеометрию на обработанной поверхности нужно быстро, надежно и без лишних затрат проконтролировать.

Оптимизация микрогеометрии для конкретного функционального свойства поверхности и ее нормирование. Как известно, в 1975 г. в СССР был введен в действие ГОСТ

2789-73 на шероховатость поверхностей деталей [18] и сразу проявилась его полная метрологическая необеспеченность, которая, в несколько меньшей степени, сохранилась до сих пор. Однако не в этом состоит главная проблема параметрических стандартов: в большинстве стран введение аналогичных стандартов сопровождалось полным метрологическим обеспечением, но результат тот же — практическая невозможность оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для их конкретных функциональных свойств.

Использование существующих параметрических стандартов делает практически невыполнимым точное описание и нормирование найденной любым способом оптимальной микрогеометрии, т.к. для точного описания профиля поверхности требуется от трех (в простейшем случае) до двадцати пяти параметров. Непригодность этих стандартов для оптимизации микрогеометрии наглядно демонстрирует следующий рис. 2, где приведены профили двух зеркально противоположных поверхностей.

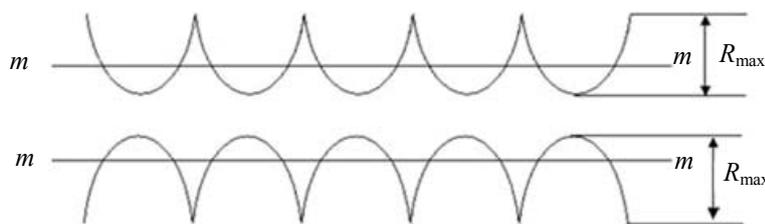


Рис. 2

Все используемые параметры микрогеометрии, например Ra и Rz , для этих профилей абсолютно одинаковы, а различие функциональных свойств, зависящих от микрогеометрии, для таких поверхностей не требует доказательств. Параметры Ra и Rz характеризуют всего лишь степень „гладкости“ поверхности, чего явно недостаточно для большинства ее функциональных свойств.

Следует подчеркнуть условность в данном случае термина „оптимизация“ микрогеометрии. В действительности речь может идти только о нахождении лучшей микрогеометрии из возможных в условиях конкретного производства. Тем не менее расточительно пренебрегать возможностью и такой „оптимизацией“. Существенное влияние микрогеометрии на два десятка функциональных свойств поверхностей доказано [19], но даже для доказанных случаев при использовании существующих параметрических стандартов процесс оптимизации микрогеометрии практически нереализуем.

В 1970-х гг. был предложен новый метод оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей, названный непараметрическим (графическим). В многочисленных публикациях рассмотрены все необходимые для практического использования аспекты этого метода [1—3, 20—36]. Нам неизвестны какие-либо опубликованные доказательства неприемлемости предложенного метода или отрицательный отзыв на эти работы, поэтому о причинах „прохладного“ отношения к методу можно только догадываться.

Так как в немногочисленных пока случаях практического применения непараметрического подхода к оценке и контролю характеристик поверхностного слоя деталей (не только микрогеометрии, см. [35]) получены положительные результаты, считаем целесообразным кратко изложить суть этого метода применительно к оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей приборов и машин. В качестве критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей деталей используются графические изображения различных функций. В менее ответственных случаях это могут быть графики опорных кривых (кривых Аббота) и функций распределения ординат или тангенсов углов наклона профилей или микротопографий, а для более точной оценки и контроля — графики плотностей распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей или микротопографий. При создании программ распознавания графических изображений в качестве критериев лучше использовать графики самих профилей и

в пределе — графические изображения микро топографии поверхностей. Последнее практически означает возврат к комплексной оценке, характерной для ранее используемых образцов шероховатости, но с исключением субъективизма оценки, поскольку все операции предполагают полную компьютеризацию процесса.

Для улучшения какого-либо функционального свойства поверхности за счет ее микрогеометрии вначале нужно убедиться, влияет ли микрогеометрия на это свойство. С этой целью изготовим три образца, ничем, кроме микрогеометрии, не различающиеся (образцы можно отжечь, чтобы исключить возможное влияние наклепа на это свойство). Подвергнем испытаниям эти образцы в максимально одинаковых условиях с замером интересующего нас свойства. Если результаты будут практически одинаковы, то микрогеометрия поверхности не влияет на это свойство, и ее не нужно нормировать и контролировать. При различиях в результатах испытаний нужно искать лучшую из возможных микрогеометрию, обеспечивающую максимальную величину этого свойства. График соответствующей функции профиля или микро топографии для лучшего образца принимается за эталон для заданного функционального свойства поверхности.

Очевидно, что если какой-либо фактор оказывает существенное влияние на эксплуатационное свойство изделия, это влияние нужно оптимизировать и нормировать в технической документации на серийную продукцию. Традиционно нормируются марки материалов и особые их качества, компоненты геометрической точности и т.д.; в соответствии с ГОСТ 2789-73 нормируется и микрогеометрия поверхностей деталей, а точнее — параметры шероховатости, чаще всего Ra или Rz . Нецелесообразность такого нормирования связана с тем, что какой-либо параметр не может предопределять какое-либо свойство поверхности, да и не исключено многообразие профилей поверхности при конкретном значении любого параметра (см. рис. 2). Все параметры по ГОСТ, включая tp на средней линии, одинаковы, поэтому при точном обеспечении нормированного параметра невозможно предсказать, какой микрорельеф будет получен.

Доказано (см., например, [34, 36]), что для оптимизации микрогеометрии поверхности для конкретного функционального свойства требуется выполнение определенных условий. При использовании параметрических стандартов точно описать и нормировать оптимальную микрогеометрию практически невозможно из-за необходимости использования большого количества параметров и их технологического обеспечения. Пренебрегать реальной оптимизацией микрогеометрии поверхностей для их конкретных свойств убыточно, поскольку только за счет нее возможно многократно улучшить качественные показатели выпускаемой продукции. Нерационально и нормировать, обеспечивать и контролировать микрогеометрию поверхности в тех случаях, когда ее влияние несущественно или не известно.

Исходя из сказанного предлагается:

— нормировать не параметры, а свойства поверхности, существенно зависящие от ее микрогеометрии;

— каждому функциональному свойству, существенное влияние которого на микрогеометрию доказано, присвоить постоянный номер и проставлять его на стандартизованном знаке вместо незначущего параметра;

— с целью контроля серийной продукции на каждом предприятии для необходимых свойств поверхностей экспериментально построить эталоны в виде графиков вышеназванных функций или, при наличии соответствующего программного продукта, графических изображений эталонного профиля, а лучше — эталонной микро топографии поверхности (рис. 3, здесь Y_i — ордината профиля; W — вероятность появления этой ординаты; заштрихованная площадь — поле допуска эталона). Величина допуска, а также графическое

изображение кривой в качестве эталона будет зависеть, например, от степени важности этого свойства.

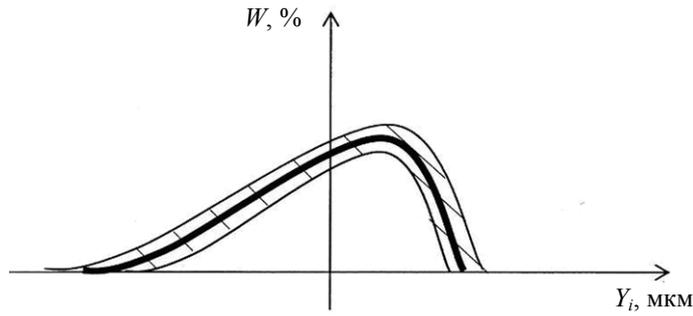


Рис. 3

Технологическое обеспечение оптимальной микрогеометрии функциональных поверхностей. Сначала приведем примеры технологической управляемости предложенных графических критериев оценки и контроля микрогеометрии. Для этого покажем, что разные графические изображения функций обязательно реагируют на изменение вида и режима обработки поверхностей, но «чувствительность» предложенных графических критериев различна, это и предопределяет их предпочтительное применение для решения практических задач разной степени значимости.

Исследовались такие виды обработки, как точение, фрезерование, шлифование, электроискровая обработка, и везде наблюдалась четкая и однозначная технологическая управляемость графическими критериями. На рис. 4 иллюстрируется влияние подачи даже на такой интегральный критерий, как функция распределения ординат (O_w) и тангенсов углов наклона (N_w) профиля [34], при алмазном точении латуни (числа на графиках обозначают величину подачи в миллиметрах на оборот).

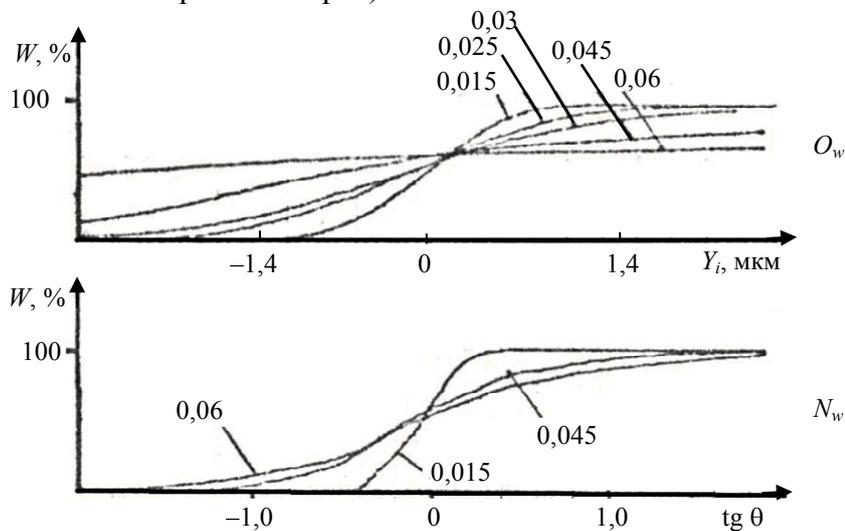


Рис. 4

На рис. 5 приведена плотность распределения ординат (a) и тангенсов углов наклона профилей поверхностей (b), обработанных импульсным микрофрезерованием (H — отношение числа ординат или тангенсов углов наклона текущей величины к количеству измеренных текущих величин; $\text{tg} \alpha$ — тангенс угла наклона профиля; Rq — среднее квадратичное отклонение профиля от средней линии, мкм) [22]. В этом случае исследовалось влияние амплитуды импульса на шероховатость поверхности при импульсном фрезеровании (производилась дополнительная осцилляция инструмента). Обработка образцов производилась на прецизионном вертикальном обрабатывающем центре Realmeca RV-2 5A SP с использованием концевой твердосплавной фрезы диаметром 6 мм. Охлаждение выполнялось

с помощью эмульсии. Образцы фрезеровались при следующих параметрах обработки: подача — 450 мм/мин, частота вращения фрезы — 90 000 об/мин, глубина резания — 0,5 мм. Амплитуда импульса изменялась от 10 до 25 мкм с шагом 5 мкм.

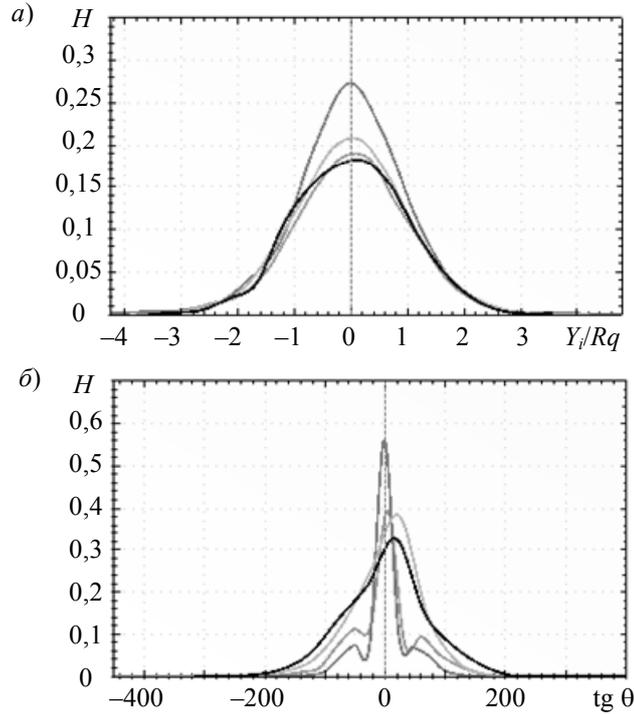


Рис. 5

На рис. 6 и 7 представлены плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей поверхностей, полученных с помощью электрофизической (электроискровой) технологии на восьми различающихся длительностью импульса режимах обработки. Длительность импульса составила для исследуемого образца 1 — 23,7; 2 — 42,2; 3 — 56,2; 4 — 75; 5 — 100; 6 — 133,4; 7 — 154; 8 — 205,4 мс [21].

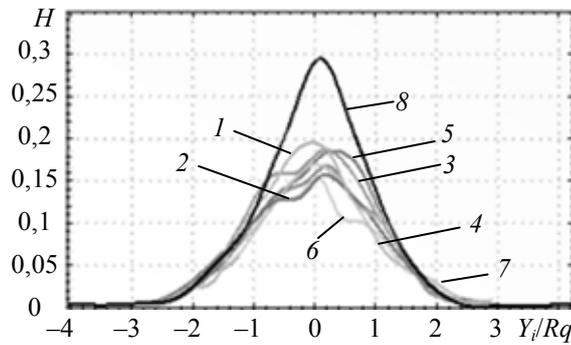


Рис. 6

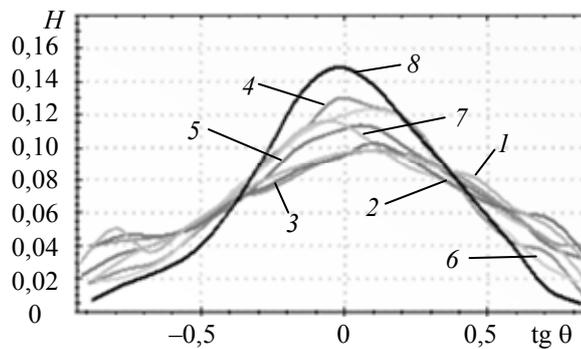


Рис. 7

Приведем методику технологического обеспечения оптимальной микрогеометрии обрабатываемых функциональных поверхностей деталей:

- 1) изготавливается максимально возможное в конкретных производственных условиях число образцов, различающихся только исходной микрогеометрией поверхности;
- 2) для каждого образца фиксируются виды и режимы обработки;
- 3) испытывается требуемое свойство (в одинаковых условиях) всех образцов;
- 4) технологические методы воспроизведения экспериментально определенного наилучшего микрорельефа для заданного функционального свойства поверхности выявляются автоматически;
- 5) вся технологическая информация по изготовлению наилучшего образца заносится в базу данных по установлению оптимальной микрогеометрии и технологических методов ее обеспечения; при заполненной базе данных не требуется проведение специальных экспериментов;
- 6) технология изготовления лучшего образца нормируется в технологию изготовления серийной продукции.

Контроль полученной микрогеометрии на соответствие заданной. Ранее шероховатость (микрогеометрия) поверхностей деталей регламентировалась с помощью классов, каждому из которых соответствовал специально изготовленный образец, а соответствие указанным на чертеже классам реально полученной шероховатости оценивалось визуально. Главные недостатки такого подхода — несовершенство зрения человека и субъективность; ныне действующие стандарты имеют, по нашему мнению, еще больший недостаток — слишком низкую информативность параметрических критериев оценки и контроля микрогеометрии поверхностей.

Неэффективность использования стандартных параметров микрогеометрии поверхностей доказывают публикации отечественных и зарубежных авторов, предлагавших все новые параметры либо так называемый комплексный параметр, обеспечивающий корреляцию с конкретными функциональными свойствами поверхностей. При этом зарубежные исследователи стремились найти наиболее удобную для практики совокупность параметров, точно описывающую исследуемый профиль [37—43], а отечественные исследователи в основном искали „чудо-параметр“, который бы предопределял функциональное свойство поверхности [10—13]. В теории случайных функций и случайных полей давно доказана бесперспективность нахождения такого параметра.

Изложим суть методики оценки и контроля микрогеометрии с использованием графических критериев:

— до испытаний серии образцов на конкретное функциональное воздействие с поверхности каждого образца необходимо снять профиль или микро топографию, с помощью соответствующей программы обработать информацию и результаты обработки занести в базу данных;

— в качестве эталона следует использовать любой непараметрический критерий, например, график функции распределения ординат профиля или кривую Аббота, полученные для лучшего по результатам испытаний образца;

— в зависимости от степени важности изделия можно установить конкретный допуск на отклонение непараметрического критерия контролируемого образца от эталонного критерия (см. рис. 3);

— при контроле микрогеометрии серийного образца достаточно совместить соответствующий графический критерий, полученный для контролируемой поверхности, с эталоном;

— если графическое изображение критерия не выходит за пределы допуска относительно эталона, микрогеометрию следует считать удовлетворительной;

— при выходе графического критерия за пределы допуска следует браковать изделие по требованиям к микрогеометрии поверхности.

Подход с нормированием не параметров микрогеометрии, а зависящих от нее свойств поверхностей, и с присвоением этим свойствам постоянных номеров, содержит дополнительную внутреннюю логику. Иногда современный конструктор, предоставляющий на чертеже значения каких-либо параметров микрогеометрии, даже не знает их сущности, а нормирование функциональных свойств исключает такое „слепое“ нормирование. Физический смысл параметров микрогеометрии, в основном в силу их практической бессмысленности, легко забыть, но функциональное назначение создаваемого изделия известно.

С целью обеспечения быстрого, надежного и недорогого контроля микрогеометрии поверхностей нами разработаны и зарегистрированы программные продукты [44, 45] для автоматизированных оценки и контроля микрогеометрии поверхностей с использованием графических критериев (на основе профилей — двумерный случай и на основе микро топографий — трехмерный). Программа написана для платформы .NET Framework 3.5 в среде разработки Microsoft Visual Studio 2008 на языке C#. Для отображения двумерных графиков и гистограмм используется ZedGraph версии 5.1.5. Для вывода на экран микро топографий поверхности и других трехмерных графиков используется библиотека OpenTK версии 1.1.

Файл, описывающий профиль поверхности, в общем случае содержит информацию об ординатах профиля и соответствующих им абсциссах. Программа поддерживает следующие форматы:

- xls (используется в измерительно-вычислительном комплексе «Профиль»);
- asc (используется в профилографе-профилометре Hommel Tester T8000 фирмы Hommel werke);
- txt (используется в настольном контактно-щуповом профилометре Surtronic 3+ фирмы Taylor-Hobson);
- prf (используется в контактно-щуповом профилометре Form Talysurf Series 2 фирмы Taylor-Hobson);
- pr (используется в лазерном профилометре UVM-Microfocus Compact).

Поскольку на предприятиях продолжают использовать ГОСТ 2789-73 для оценки, контроля и оптимизации поверхности, было необходимо автоматизировать подсчет параметров микрогеометрии в разработанном программном продукте. Это также было нужно для сравнения параметрических и графических критериев между собой.

Графические критерии содержат более полную, нежели параметрические критерии, информацию о профиле поверхности. Однако информативность графических критериев различается. Так, кривая Аббота и графики функции распределения ординат и тангенсов углов наклона используются для контроля менее значимых и ответственных поверхностей. Отдельные выступы или впадины практически не влияют на форму этих графиков. В то же время на графиках функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля эти выступы и впадины четко видны. Но наибольший объем информации о профиле содержит профилограмма, поэтому следует разрабатывать механизмы сравнения профилей по их профилограммам.

Кратко опишем алгоритмы расчета для построения графических критериев. В общем случае алгоритм расчета функции плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля следующий.

1. Весь диапазон значений (ординат или тангенсов углов наклона) разбивается на участки одинаковой длины — интервалы группировки данных. Число интервалов k выбирается по формуле Стерджесса [46]:

$$k = 1 + 3,322 \lg N, \quad (1)$$

где N — общее количество тангенсов или ординат; дробное значение k округляется до ближайшего целого.

Подсчитывается число попаданий ординат (рис. 8, б) или тангенсов углов наклона профиля (а) по длине профиля L (y_i — отклонение i -й точки профиля от средней линии; α_i — угол наклона профиля в i -й точке) в каждый интервал (частота попадания).

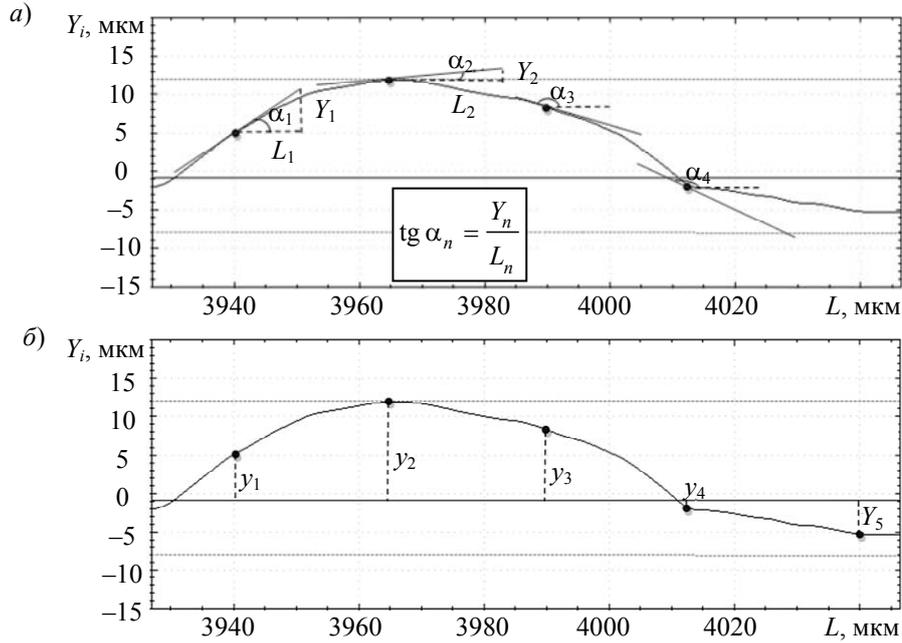


Рис. 8

При построении графика плотности распределения по оси абсцисс откладываются интервалы ординат профиля или тангенсов его углов наклона, по оси ординат — количество ординат или тангенсов, попавших в этот интервал (рис. 9 и 10, K — частота, т.е. число точек профиля, имеющих данную ординату).

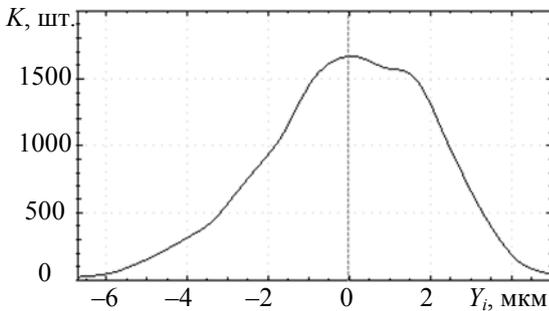


Рис. 9

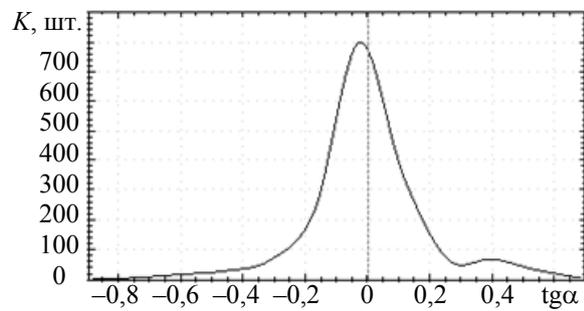


Рис. 10

Исследовалась гипотеза о нормальности распределения ординат профиля [16] с помощью критерия согласия $n\omega^2$. В целом доказано, что эта гипотеза „приемлема для поверхностей, обработанных абразивными инструментами, а также металлическими инструментами на отделочных режимах“ [16, с. 206], в то же время она непригодна при обработке на черновых, а временами и чистовых, режимах (например, когда в профиле содержится мощная периодическая составляющая). Отличие текущего закона распределения функции от нормального можно оценить по критерию Колмогорова [47].

2. С помощью плотности распределения ординат безразмерного профиля можно сравнивать профили со сколь угодно различающимися отклонениями от средней линии (с совпадающей длиной базовой линии, а также с разной дискретностью профиля, т.е. количеством точек на базовой длине).

3. Для получения плотности распределения ординат безразмерного профиля из обычной плотности распределения ординат необходимо:

- определить значение Rq данного профиля;

- разделить каждое значение ординат исходного профиля на полученное значение Rq ;
- по полученному профилю с безразмерными ординатами построить плотность распределения этих ординат.

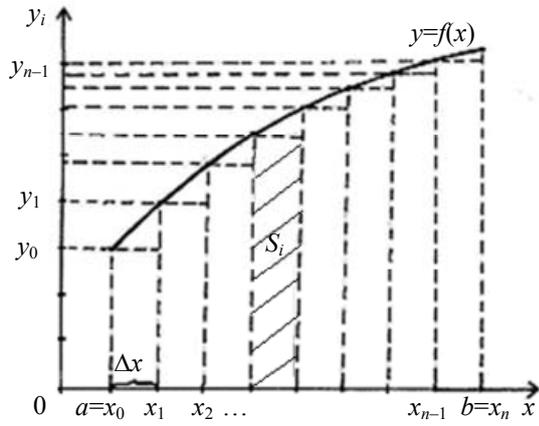


Рис. 11

Графики функции распределения ординат или тангенсов угла наклона профиля, а также кривая Аббота несут меньше информации о профиле, чем графики функции плотности распределения этих величин. Эти интегральные графические критерии можно использовать для приблизительной оценки влияния микрогеометрии на эксплуатационное свойство поверхности. Функцию распределения можно вычислить как интеграл от плотности распределения по методу прямоугольников [48] на отрезке от точки a до точки b (рис. 11; y_0, y_1, y_n — значения функции $y=f(x)$ в точках x_0, x_1, x_n).

Для нахождения интеграла функции S необходимо сначала разделить отрезок на n равных частей длиной $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ а затем применить следующую формулу:

$$S \approx \sum_{i=1}^n S_i = y_0\Delta x + y_1\Delta x + y_2\Delta x + \dots + y_{n-1}\Delta x. \quad (2)$$

Полученные в программе графики функции распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля представлены на рис. 12 и 13 соответственно.

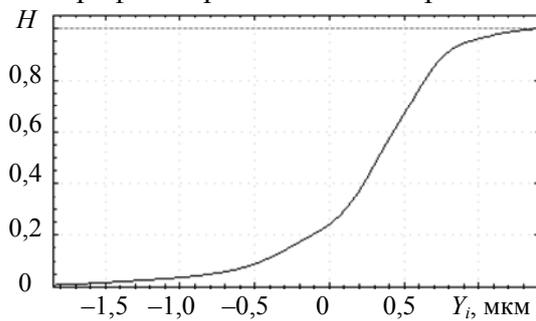


Рис. 12

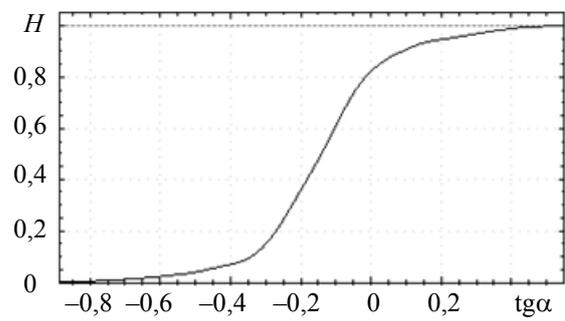


Рис. 13

Для дальнейшего сравнения профилей применяется функция распределения ординат безразмерного профиля (рис. 14).

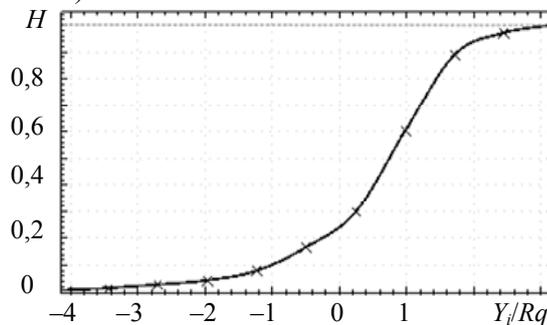


Рис. 14

Для определения влияния микрогеометрии на эксплуатационное свойство необходимо сначала исключить из профиля такие факторы, как помехи и погрешность установки. Влияние помех, особенно со стороны окружающей среды, неизбежно при записи профилей, к тому же для полного нивелирования погрешности установки контролируемого

изделия потребовалось бы много времени. В то же время применение механической или электрической фильтрации в профилометре, не всегда удобно. Например, для правильной настройки предустановленных фильтров необходимо обладать информацией об их возможностях, а для старых моделей функция настройка фильтров даже не доступна. Использование ЭВМ позволяет фильтровать профиль с помощью прямого и обратного преобразования Фурье [49].

После прямого преобразования Фурье можно получить амплитудный спектр профиля, где каждой гармонике соответствует определенный тип отклонений, например, отклонение формы, погрешность установки, волнистость, помехи. После удаления ненужной информации из амплитудного спектра и обратного преобразования Фурье будет получен профиль, в котором содержится только необходимая нам информация. Таким образом можно определить не только влияние микрогеометрии на эксплуатационное свойство, но и, например, отдельно влияние волнистости.

Для проведения фильтрации используется алгоритм быстрого преобразования Фурье с прореживанием по частоте [49].

После прямого фурье-преобразования можно построить амплитудный спектр профиля (рис. 15, A и f — амплитуда и частота гармоник профиля).

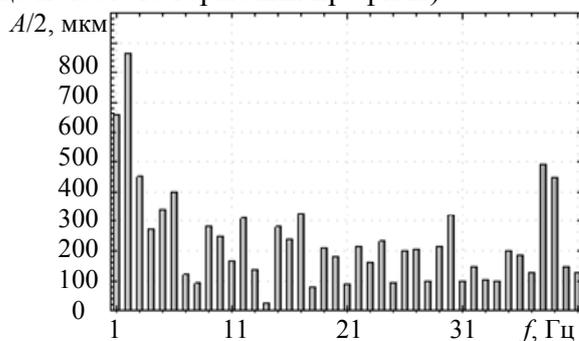


Рис. 15

В алгоритме пользователь выбирает гармоники, которые он хочет убрать из амплитудного спектра. Доказано [41, 50], что самая низкочастотная гармоника содержит информацию об отклонении формы поверхности, а также перекосе контролируемой поверхности при ее установке, вторая и третья гармоники обычно содержат информацию о волнистости, падающая часть спектра включает информацию о шероховатости, а незатухающая высокочастотная часть спектра — о помехах. Таким образом, возможно убрать из профиля ненужную информацию и производить оценку только по необходимому виду отклонений поверхности.

Полученный после обратного фурье-преобразования массив является нужным нам отфильтрованным профилем (рис. 16, 1 — профиль до фильтрации; 2 — после фильтрации). В рассмотренном случае в амплитудном спектре убраны первые три самые низкочастотные гармоники, т.е. из профиля исключена информация об отклонении формы, погрешности установки, а также волнистости.

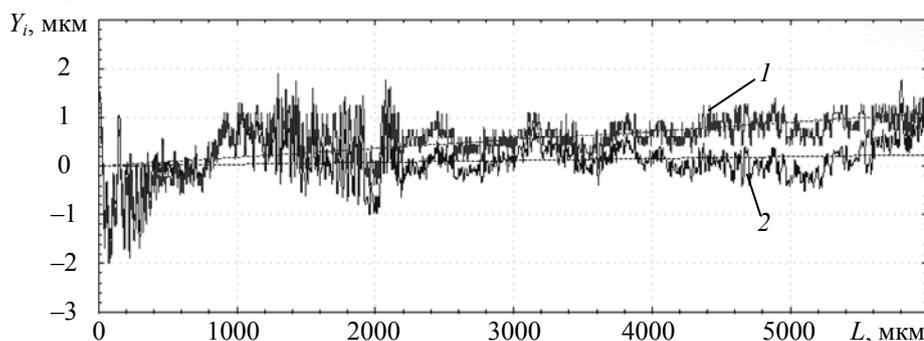


Рис. 16

После фильтрации профилей можно проводить их сравнение. Алгоритм сравнения двух и более профилей следующий. Исследователь (например, технолог) выбирает реальную поверхность изделия (эталон), микрогеометрия которой была признана наилучшей из возможных в процессе испытаний для заданного свойства, а соответствующий графический критерий оценки этой микрогеометрии принимается в качестве эталона, с которым сравниваются соответствующие графические критерии, полученные для поверхностей контролируемой серийной продукции. Для эталонной и сравниваемых поверхностей строятся графические критерии, например, плотности распределения ординат профиля. Далее графические критерии накладываются друг на друга, при этом для эталонного критерия предварительно задается поле допуска, величина которого выбирается в зависимости от назначения поверхности контролируемого изделия.

Затем определяется, удовлетворяют ли графические критерии сравниваемых поверхностей указанному полю допуска или выходят за него. Пример поверхностей, не удовлетворяющих допуску эталонной поверхности, представлен на рис. 17 (1 — эталонный критерий с допуском, 2 — критерий контролируемой поверхности).

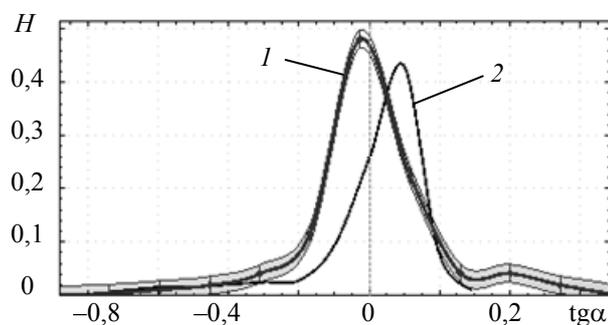


Рис. 17

Для эталонного профиля поверхности строятся графики функции плотности распределения и функции распределения ординат безразмерного профиля, графики функции плотности распределения и функции распределения тангенсов углов наклона профиля, а также кривая Аббота. Для этих графиков строится область допуска. В программе область допуска может рассчитываться по методу расчета относительного или абсолютного допуска или по методу расчета допуска по шкале.

Известно, что графические критерии для микрофотографий поверхности более информативны, чем графические критерии для профилей поверхности. Поэтому расширение непараметрического подхода на микрофотографии и его автоматизация позволяют добиться большей достоверности результатов оценки и контроля. Однако самой полной информацией о микрогеометрии обладает микрофотография поверхности.

Информация о микрофотографии в виде трехмерных координат точек поверхности поступает от специальных приборов — профилографов. Формат файла зависит от производителей программного обеспечения. Программа поддерживает следующие форматы:

- pr (лазерный профилометр UBM-Microfocus Compact;
- dat (машина для нанопозиционирования и наноизмерения, изготовленная в Техническом университете г. Ильменау, Германия).

Полученные с профилометров входные данные обрабатываются, и в программе происходит заполнение трехмерного массива пространственными координатами точек полученной микрофотографии поверхности. Далее на экран выводится микрофотография с цветовой индикацией высоты профиля (рис. 18).

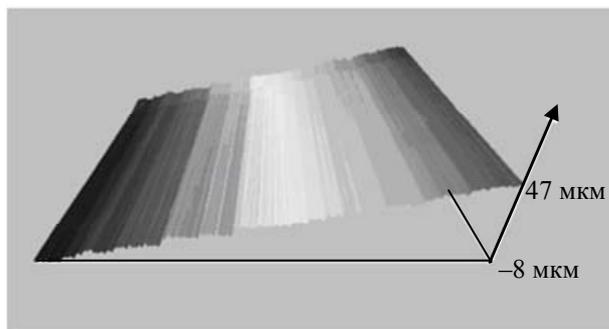


Рис. 18

Необходимым предварительным этапом для сравнения микротопографий поверхности является их фильтрация. С помощью фильтрации возможно как исключить ненужные виды отклонений поверхности (например, помехи, отклонение формы), так и определить влияние конкретного типа отклонений на какое-либо эксплуатационное свойство, например, волнистости. В данном случае используются алгоритмы прямого и обратного быстрых двумерных дискретных фурье-преобразований. Если представленную на рис. 18 микротопографию отфильтровать, оставив только микрогеометрию, то получим результат, представленный на рис. 19 (убраны погрешность установки, отклонение формы и волнистость поверхности).

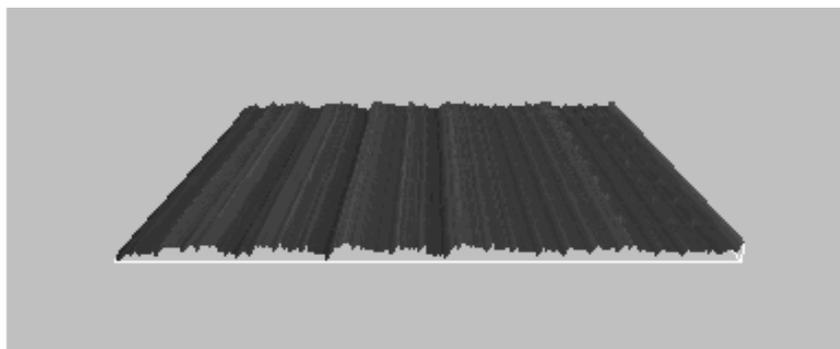


Рис. 19

В качестве графических критериев для контроля и оценки микрогеометрии поверхности в данном случае выступают графики функций распределения и функций плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона микротопографии. Эти графические критерии содержат больше информации о микрогеометрии поверхности по сравнению с представленными выше графическими критериями для профилей.

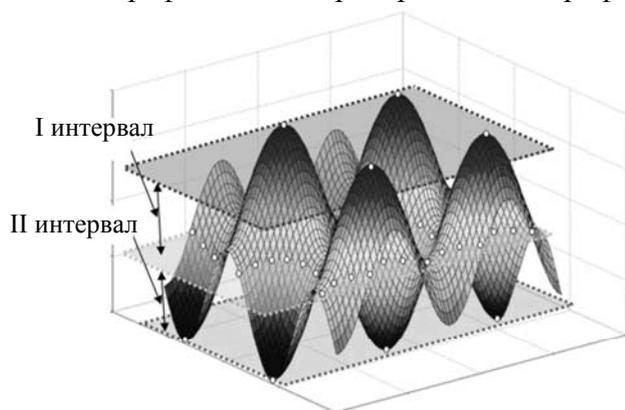


Рис. 20

Приведем алгоритм расчета функции плотности распределения:

— нахождение функции так называемой „средней плоскости“ (плоскость, проведенная так, что среднеквадратическое отклонение микротопографии до нее минимально, т.е. суммарный объем пустот под ней равен суммарному объему материала над ней);

— так же, как и в случае построения функции плотности распределения для профиля поверхности, весь диапазон ординат профиля разбивается на интервалы группировки данных. Секущие плоскости проводятся параллельно „средней плоскости“ (рис. 20);

— подсчет числа попаданий ординат микротопографии в каждый интервал — определение частоты;

— построение графика плотности распределения: по оси абсцисс откладываются интервалы, по оси ординат — число ординат, попавших в этот интервал; пример плотности распределения ординат микротопографии представлен на рис. 21.

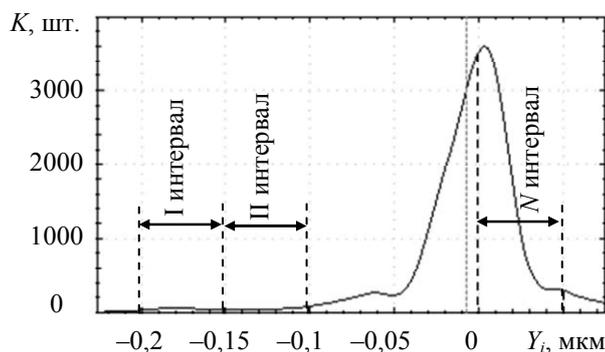


Рис. 21

Для сравнения графических критериев микротопографий используется плотность распределения ординат безразмерной микротопографии; алгоритм построения плотности распределения ординат безразмерной микротопографии (рис. 22, Sq — среднеквадратическое отклонение ординат исходной микротопографии) тот же, что и для плотности распределения ординат безразмерного профиля.

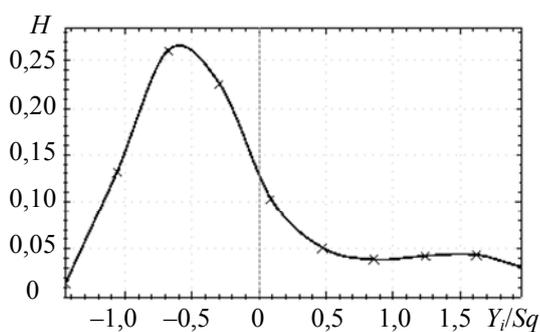


Рис. 22

В общем случае процедура оценки и контроля микротопографии с помощью графических критериев включает следующие этапы:

- выбор эталонной поверхности, микрогеометрия которой после испытаний была признана лучшей для данного эксплуатационного свойства, и построение для нее соответствующего графического критерия;
- выбор контролируемой поверхности (их может быть несколько);
- измерение микротопографии контролируемой поверхности с помощью профилографа;
- построение графика соответствующей функции контролируемой микротопографии;
- построение для графического критерия эталонной поверхности области допуска;
- наложение графических критериев эталонной и контролируемых поверхностей друг на друга;
- визуальное определение совпадения графиков в пределах допуска или выхода за область допуска.

Примеры сравнения графических критериев для контроля и оценки микротопографии поверхности представлены на рис. 23 (1 — эталонная поверхность с полем допуска; 2 — контролируемая поверхность).

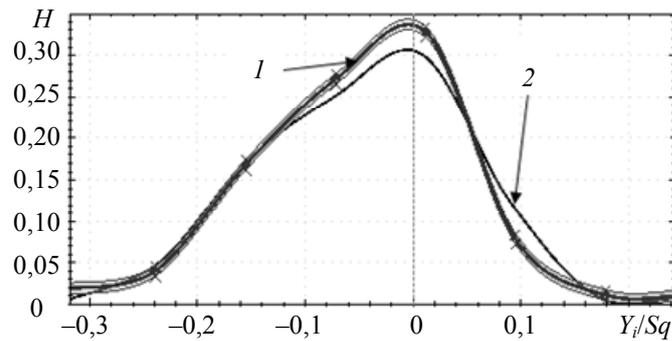


Рис. 23

Заключение. Конечно, оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей для их конкретных функциональных свойств — не единственная задача, по тем или иным причинам не решенная к настоящему времени, но к ее решению придется приступить, когда используемые подходы к повышению качества изделий станут экономически не выгодными. В настоящей статье предложен практически проверенный, эффективный и по всем показателям приемлемый метод решения этой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Валетов В. А. Возможные критерии оценки шероховатости обработанных поверхностей // Тр. ЛКИ. 1976. Вып. 108. С. 135—140.
2. Валетов В. А. Изменение микрогеометрии поверхностей трения деталей цилиндро-поршневой группы судовых дизелей в процессе их работы // Трение и износ. 1983. Т. 4, № 6. С. 1104—1107.
3. Валетов В. А. Целесообразность изменения стандарта на шероховатость поверхностей деталей // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. № 6. СПб: СЗПИ, 1997. С. 118—121.
4. Витенберг Ю. Р. Система характеристик шероховатости поверхности // Вестник машиностроения. 1970. № 11. С. 56—58.
5. Витенберг Ю. Р. Шероховатость поверхности и методы ее оценки. М.: Судостроение, 1971. 98 с.
6. Демкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 227 с.
7. Демкин Н. Б., Курова М. С. Распределение выступов и впадин профиля шероховатости поверхности // Изв. вузов. Машиностроение. 1975. № 7. С. 58—62.
8. Демкин Н. Б., Рыжов Э. В. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
9. Дунин-Барковский И. В., Карташова А. Н. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М.: Машиностроение, 1978. 232 с.
10. Комбалов В. С. Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей. М.: Наука, 1983. 134 с.
11. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
12. Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1974. 526 с.
13. Крагельский И. В., Комбалов В. С. Расчет величины стабильной шероховатости после приработки (упругий контакт) // ДАН СССР. 1970. Т. 193, № 3. С. 554—556.
14. Крагельский И. В., Рудзит Я. А. Методика определения средних значений радиусов закругления вершин неровностей профиля шероховатости // Приборостроение. 1968. № 3. С. 15—24.
15. Рыжов Э. В. Контактная жесткость деталей машин. М.: Машиностроение, 1966. 194 с.
16. Хусу А. П., Виттенберг Ю. Р., Пальмов В. А. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход). М.: Наука, 1975. 344 с.

17. Рудзит Я. А. О параметрах шероховатости поверхностей, обработанных абразивными инструментами // Вероятностно-статистические основы процессов шлифования и доводки. Л.: СЗПИ, 1974. С. 63—75.
18. ГОСТ 2789-73 (СТ СЭВ 638-77). Шероховатость поверхности: параметры, характеристики, обозначения.
19. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. Л.: Машиностроение, 1982. 247 с.
20. Иванов А. Ю., Леонов Д. Б. Влияние шероховатости поверхности на усилие распрессовки прессовых соединений // Научно-технический вестник ИТМО. 2013. № 3 (85). С. 147—150.
21. Медунецкий В. В. Исследование качества электроэродированных поверхностей с использованием непараметрических критериев: Дис. ...канд. техн. наук. СПб, НИУ ИТМО, 2013. 119 с.
22. Филимонова Е. А. Разработка методики и программы автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей деталей приборов с помощью графических критериев и их использование в технологических исследованиях: Дис. ...канд. техн. наук. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 125 с.
23. Юльметова О. С. Разработка технологических методов управления функциональными характеристиками узлов гироскопов: Дис. ...канд. техн. наук. СПб: СПб ИТМО, 2011. 120 с.
24. Юльметова О. С., Юльметова Р. Р., Сисюков А. Н. Разработка программы в среде Matlab для обработки и анализа микрогеометрии поверхности // Биомедицинские технологии, мехатроника и робототехника: Сб. тр. конф. молодых ученых. Вып. 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. С. 300—304.
25. Valetov W. A., Grabow J. Neue Verfahren auf dem Gebiet der Analyse und Kontrolle der Oberflaechenmikrogeometrie // 41 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. 1996. Bd 2. S. 622—625.
26. Valetov W. A., Grabow J., Tretiakow S. Zur experimentiellen Erforschung der Mikrogeometrie von Reibungsoberlaechen // 47 Intern. Wissenschaftliches Kolloquium. 2002. Tagussband. S. 403—404.
27. Waletow W., Stauffert G. Beobachtungen beim Rauheitmessen // Technische Rundschau. 1980. N 50/51. S. 16.
28. Валетов В. А. Влияние исходной микрогеометрии на коэффициент сопротивления качению и долговечность роликовых направляющих // Трение и износ. 1982. Т. III, № 5. С. 914—918.
29. Валетов В. А. Влияние исходной шероховатости поверхностей роликовых направляющих на их усталостную прочность // Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. Новосибирск: НТО Машпром, 1982. С. 24—26.
30. Валетов В. А. Влияние фильтрации профиля на правильность оценки зависимости функциональных свойств поверхности от ее микрогеометрии // Вопросы изготовления, сварки и монтажа судостроительных конструкций. Л.: ЛКИ, 1982. С. 144—149.
31. Валетов В. А. Использование новых критериев для оценки микрогеометрии поверхностей деталей машин // Технологическое управление качеством обработки и эксплуатационными свойствами машин. Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1980. С. 23—25.
32. Валетов В. А. О практической пригодности некоторых критериев для оценки шероховатости поверхности // Технология корпусостроения, судового машиностроения и сварки в судостроении. Л.: ЛКИ, 1978. С. 62—65.
33. Валетов В. А. Оптимизация микрогеометрии поверхностей деталей в приборостроении. Л.: ЛИТМО, 1989. 100 с.
34. Валетов В. А. Развитие теории микрогеометрии поверхностей и разработка методов оценки ее влияния на эксплуатационные свойства деталей судового и общего машиностроения: Дис. ... докт. техн. наук. Л., 1982. 388 с.
35. Валетов В. А., Иванов С. Ю. Проблемы комплексной оценки и контроля характеристик поверхностного слоя деталей машин и приборов. Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем СПб – 2002 – С.164—167
36. Валетов В. А., Иванов А. Ю. Непараметрический подход к оценке качества изделий // Металлообработка. 2010. № 6. С. 55—59.
37. Arhard J. F. Elastic Deformation and the Contact of Surfaces // Nature. 1951. Vol. 172. P. 918—919.
38. Greenwood J. A., Tripp J. H. The elastic contact of rough spheres // ASME J. Appl. Mech. E. 1967. Vol. 34, N 1. P. 153—159.

39. Greenwood J. A., Williamson J. B. P. Contact of nominally flat surfaces // Proc. Roy. Soc. London. 1966. Vol. 295, N 1442. P. 300—319.
40. Nayak P. R. Random Process Model of Rough Surfaces // J. of Lubrication Technology. 1971. Vol. 93. P. 398—407.
41. Sayles R. S., Thomas T. R. Stiffness of Machine Tool Joints: A Random Process Approach // J. Eng. Ind. Trans. ASME. 1977. Feb. P. 250—256.
42. Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay. ASME B46.1–2002–IDT.
43. Surfaces roughness – Terminology – Pt. 1: Surface and its parameters. International Standard ISO 4287/1–1984.
44. . программы для ЭВМ № 2011613843 Программа автоматизированного контроля микрогеометрии поверхностей Свид. о гос. рег с помощью непараметрических критериев / В. А. Валетов, Е. А. Филимонова. Оpubл. 18.05.2011.
45. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2014614458. Программа автоматизированного контроля и оценки микрогеометрии поверхностей с помощью микро топографий / В. А. Валетов, Е. А. Филимонова. Заявл. 03.03.2014; опубл. 24.04.2014.
46. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М: Мир, 1978. 834 с.
47. Kolmogoroff A. Sulla determinazione empirica di una legge di distribuzione // Giornale dell' Istituto Italiano degli Attuari. 1933. Vol. 4, N 1. P. 83—91.
48. Метод прямоугольника [Электронный ресурс]: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_прямоугольников>.
49. Снеддон И. Преобразования Фурье. М.: ИЛ, 1955. 668 с.
50. Whitehouse D. J., Archard J. F. The Properties of Random Surfaces of Significance in their Contact // Proc. Roy. Soc. London. Ser. A 316. 1970. S. 97—121.

Сведения об авторе

Вячеслав Алексеевич Валетов — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: valetov.v@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.10.14 г.

Ссылка для цитирования: Валетов В. А. Проблемы оптимизации микрогеометрии поверхностей деталей для обеспечения их конкретных функциональных свойств // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 4. С. 250—267.

PROBLEMS OF OPTIMIZATION OF WORKPIECE SURFACE MICROGEOMETRY TO ENSURE SPECIFIC FUNCTIONAL PROPERTIES

V. A. Valetov

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: valetov.v@mail.ru*

Optimization of surface microgeometry is proved to be advisable for provision of its specific functional properties; conditions for the optimization to be fulfilled are defined. Using concrete examples, microgeometry optimization on the base of parametric criteria of its assessment and control is shown to be practically impossible because of a wide range of parameters necessary for a processed surface description to be applied in serial production. A method is proposed for deduction of microgeometry being optimal (practically – the best of all feasible) for a specified property of a given workpiece surface. Technological ways for realization of the microgeometry in manufacturing process and fast, reliable, and low-cost control of the workpiece surface are developed. Computer programs using profiles and microtopographic data for control over a surface microgeometry on the base of graphic criteria are created. Examples of practical applications of the methods and programs are presented to demonstrate effectiveness of the proposed approach.

Keywords: exact description of microgeometry, standardization of microgeometry, technological provision of optimal microgeometry, control of obtained microgeometry, graphic criteria for workpiece surface microgeometry assessment and control.

Data on author

Vyacheslav A. Valetov — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of Instrumentation Technology; E-mail: valetov.v@mail.ru

Reference for citation: *Valetov V. A. Problems of optimization of workpiece surface microgeometry to ensure specific functional properties // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 4. P. 250—267 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-4-250-267