УДК 621.517, 681.142.36

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ШЛИФОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

© 2008 А.Д. Абрамов

Самарский государственный технический университет

В статье предложен новый подход к оценке микрогеометрии поверхностей деталей машин и механизмов после финишной обработки. В основу определения микрогеометрии предложен метод, основанный на применении оптико-электронных средств и компьютерных технологий. Приведены результаты оценки микрогеометрии поверхности деталей после шлифования.

Качество поверхности, с точки зрения микрогеометрии, во многих случаях является определяющим фактором, влияющим на долговечность и надежность деталей машин при их эксплуатации. Так, например, шероховатость цилиндрической поверхности роликов подшипника во многом определяет долговечность и шумовые характеристики самого подшипника при его эксплуатации.

В настоящее время о микро- и макронеровностях судят по профилограммам поверхности. Для этого используются бесконтактные и контактные методы, такие, как метод интерференции падающего и отраженного светового потока и теневой проекции, растровые и рефлектометрические методы, метод слепков, метод ощупывания световым лучом и профильный метод.

Среди профильных методов наибольшее распространение получил щуповой метод, при котором алмазная игла перемещается по поверхности детали. Информация о колебаниях иглы при перемещении по исследуемой поверхности является основой для определения таких параметров шероховатости, как среднеарифметическое отклонение профиля поверхности (Ra), высота шероховатости профиля (Rz) и т.п. [1].

Наряду с несомненными достоинствами профильных методов оценки шероховатости поверхности следует отметить их недостатки:

- аппаратуру для этих методов можно использовать только в лабораторных условиях;

– непосредственно измерять шероховатость можно у деталей ограниченных размеров и, как правило, имеющих простые поверхности (плоская, цилиндрическая и т.д.);

- профилограммы не дают комплексную оценку распределения микронеровностей по поверхности детали;

- для многих изделий требуется изготовление специальных оправок;

- для некоторых изделий использование алмазной иглы вообще недопустимо, так как при ее перемещении на исследуемой поверхности остаются микроповреждения.

В работе предложен новый метод оценки шероховатости поверхности с помощью исследовательского комплекса, который включает оптико-электронные средства (рис. 1) и программное обеспечение, позволяющее обрабатывать видеоизображения исследуемых поверхностей в соответствии с методикой, изложенной ниже.

Для исследования были изготовлены методом бесцентрового шлифования на станке СВА АКМ 25/1 абразивными кругами на вулканитовой основе три образца из стали ШХ15 с различной шероховатостью поверхности. Для этих же образцов на профилографе модели SJ - 201P были записаны профилограммы и определены стандартные параметры шероховатости: образец № 1 имел Ra=0,56 мкм, образец № 2 – Ra=0,13 мкм и образец № 3 – Ra=0,084 мкм. Найденные значения среднеарифметического отклонения профиля представляют собой средние значения, вычисленные по 25 измерениям для каждого образца.

Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер 3x2,5 мм. Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом 45°. Фор-

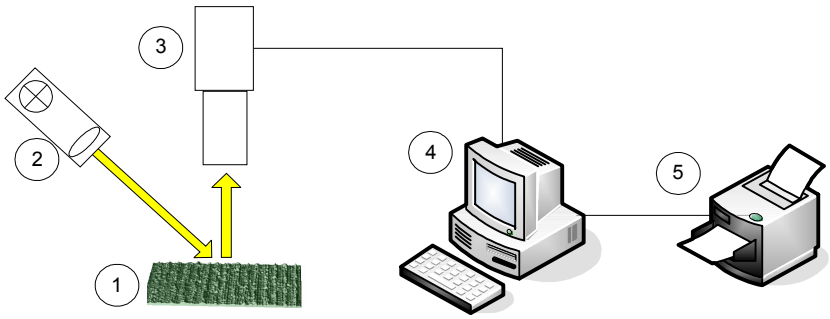


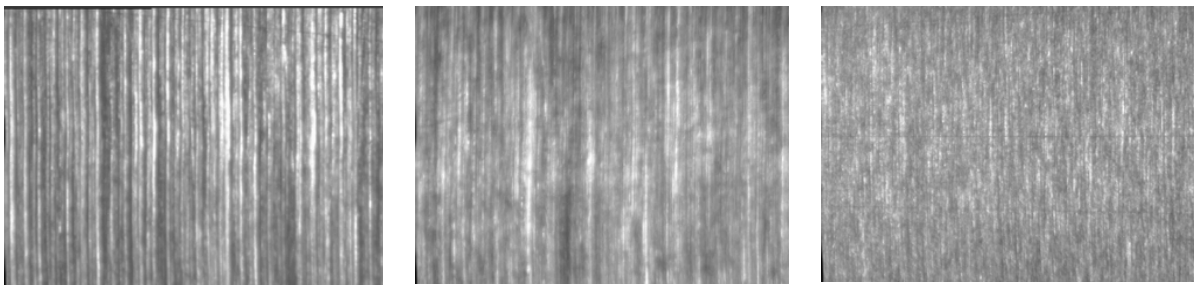
Рис. 1. Схема исследовательского комплекса:
1 – исследуемая поверхность; 2 – источник параллельного светового потока; 3 – видеокамера; 4 – компьютер; 5 – принтер

мат видеокадра, записываемого в память компьютера, составлял 320x240 пикселей. Видеоизображения этих поверхностей приведены на рис. 2.

Как видно из приведенных рисунков, выбранные образцы для исследования существенно отличаются друг от друга по внешнему виду.

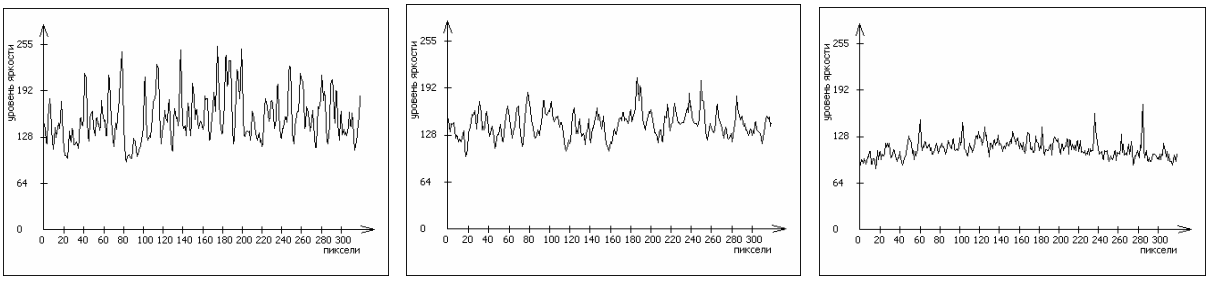
В полученных видеоизображениях исследуемых поверхностей на каждый пиксель отводилось 3 байта. Следовательно, при использовании черно-белой видеокамеры полученная информация является избыточной. В связи с этим на первом этапе было выполнено преобразование исходного изображения поверхности с помощью специально разработанной программы в формат 1 пиксель – 1 байт и при этом удалялся заголовок файла в исходном изображении. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости составил 0 – 255 условных единиц. Характерные изменения уровня яркости по строке видеокадра поверхностей исследуемых образцов приведены на рис. 3.

Анализ приведенных видеосигналов показывает влияние шероховатости поверхности как на амплитуду видеосигнала, так и на его спектр. При этом наблюдается уменьше-



Образец №1 Образец №2 Образец №3

Рис. 2. Видеоизображения исследуемых поверхностей



Образец №1 Образец №2 Образец №3

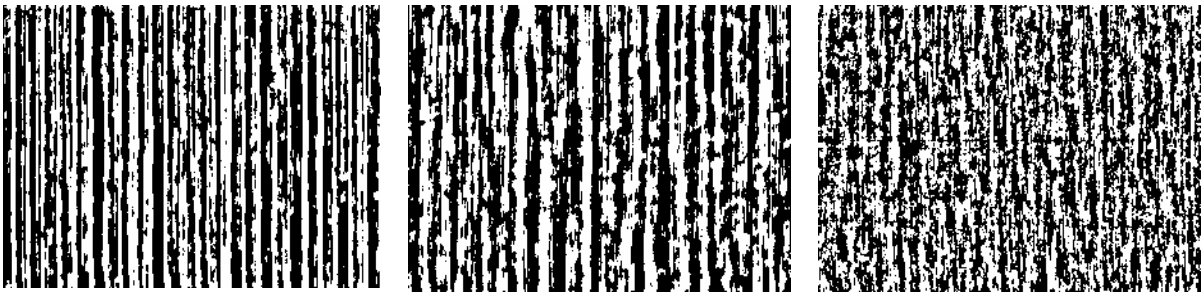
Рис. 3. Уровень яркости видеосигналов исследуемых поверхностей образцов

ние амплитуды сигнала с уменьшением шероховатости. Это можно легко объяснить тем, что чем меньше шероховатость, то тем большая часть отраженного светового потока, падающего под углом 45° к поверхности, проходит мимо объектива видеокамеры, расположенного перпендикулярно поверхности. Можно было бы воспользоваться этой особенностью для идентификации шероховатости, если бы не существенная зависимость уровня видеосигнала не только от шероховатости, но и от множества других факторов, в частности, от общего уровня освещенности, от мощности падающего светового потока и т.п. Кроме того, из радиотехники известно, что амплитудная модуляция из всех известных обладает наименьшей помехоустойчивостью [2].

В связи с вышесказанным для определения признаков, по которым можно достаточно надежно идентифицировать исследуемую поверхность, т.е. отнести ее к тому или иному диапазону шероховатости, была разработана следующая методика. Вначале многоградационное по яркости черно-белое изображение преобразовывалось в бинарное. Начиная с левого верхнего угла в исходном изображении, задавалось окно размером 21x21 пиксель, и в этом окне подсчитывался средней уровень яркости Bср. С этим уровнем яркости сравнивалось значение яркости Bi центрального элемента этого окна и производилось его преобразование по правилу: Bi=0FFH, если Bi≥Bср и Bi=00H, если Bi<Bср. После этого окно перемещалось на 1 пиксель вправо и производилось преобразование следующего центрального элемента в этом окне. Закончив преобразование в полосе 320x21 пиксель, выбранное окно смещалось вниз по вертикали на 1 пиксель, и выполнялись описанные выше действия в следующей полосе. Таким образом, преобразовывался исходный многоградационный кадр и в результате получался бинарный кадр формата 299x219 пикселей. Отметим, что рассмотренный механизм преобразования отвечает принципам медианной фильтрации изображений [3], при этом указанный оптимальный размер окна был найден экспериментально.

Анализ полученных бинарных изображений (рис. 4) показывает влияние шероховатости поверхности на ее текстуру. Так, например, для образца № 1 с более грубой шероховатостью наблюдается более четкая ориентация черных и белых компонент (полос) в вертикальном направлении, чем для образца № 3 с наименьшей шероховатостью. При этом отмечается увеличение периода чередования этих полос при переходе от образца № 1 к образцу № 2. Наличие относительно четко выраженных полос в бинарном изображении может свидетельствовать о доминирующем влиянии регулярной (периодической) компоненты в формировании текстуры поверхности. Ориентация черных и белых компонент в текстуре поверхности для образца № 3 выражена слабо, что говорит о возрастающем влиянии случайной составляющей в текстуре.

Полученные бинарные изображения использовались в дальнейшем для получения информации, по которой можно было бы различать поверхности с различной шероховатостью после отмеченной выше механической обработки. Делалось это следующим образом. В бинарном изображении исследуемой поверхности начиная с первой верхней строки выделялась полоса 299x55 пикселя. По центру этой полосы задавался эталон разме-



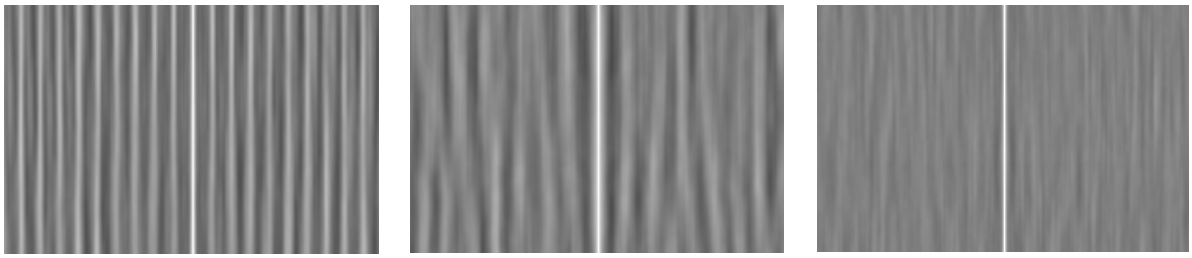
Образец №1 Образец №2 Образец №3

Рис. 4. Бинарные изображения исследуемых поверхностей

ром 60x55 пикселя. Оптимальный размер эталона также был найден экспериментально. Этот эталон перемещался по всей выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона с текущим фрагментом бинарного изображения подсчитывалась сумма совпавших пикселей в эталоне и текущем фрагменте. Этой сумме придавалось смысловое значение коэффициента корреляции. Для получения нормированного коэффициента корреляции найденная сумма делилась на 3300. Таким образом, при полном совпадении эталона и текущего фрагмента изображения, коэффициент корреляции принимал значение равное 1, которому в памяти компьютера сопоставлялся байт со значением 0FFH. Нулевому значению коэффициента корреляции при полном несовпадении эталона и текущего фрагмента соответствовал байт со значением 00H. После подсчета автокорреляционной функции в выделенной полосе задавалась следующая полоса того же формата, но смещенная вниз по вертикали на один пиксель и в ней производились те же самые вычисления, что и в первой полосе. Общее количество таких полос в кадре 299x219 пикселей было 164, а количество найденных коэффициентов корреляции в полосе составило 239 значений. Таким образом, после обработки всего бинарного кадра получалась многоградационная автокорреляционная поверхность размером 239x164 пикселя, вид которой для исследуемых образцов приведен на рис. 5.

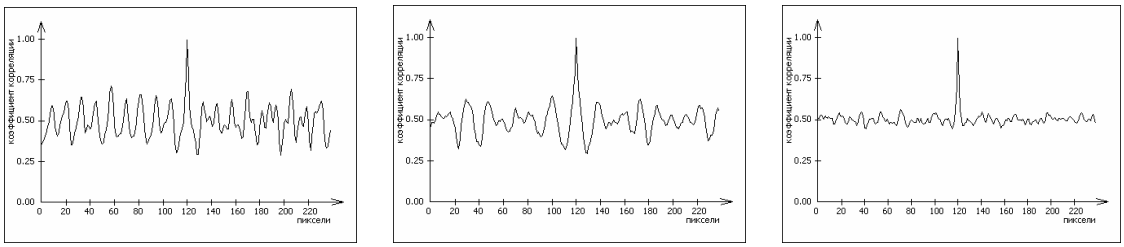
Их анализ показывает, что в этом случае также наблюдается ориентированная в вертикальном направлении текстура, при этом ориентация более четко выражена для поверхности с более грубой шероховатостью (образец № 1). Кроме того, в этих изображениях наблюдается и увеличение периода чередования полос с уменьшением шероховатости. Характерные изменения нормированных корреляционных сигналов приведены на рис. 6.

Из приведенных зависимостей также видно, что с увеличением шероховатости увеличивается частота колебаний автокорреляционной функции и увеличивается доля регулярной составляющей. При этом для поверхности с наилучшей шероховатостью (образец № 3) наблюдается резкое падение амплитуды корреляционного сигнала от места взятия эталона, что может также служить характерным признаком для идентификации (распознавания) изделий с заданными высокими показателями по качеству поверхности. Для определения уровня коэффициента корреляции r, на котором необходимо рассчитывать период колебаний автокорреляционных функций и по которому исследуемые



Образец №1 Образец №2 Образец №3

Рис. 5. Нормированные автокорреляционные поверхности исследуемых образцов



Образец №1 Образец №2 Образец №3

Рис. 6. Графики изменения нормированных корреляционных сигналов исследуемых поверхностей

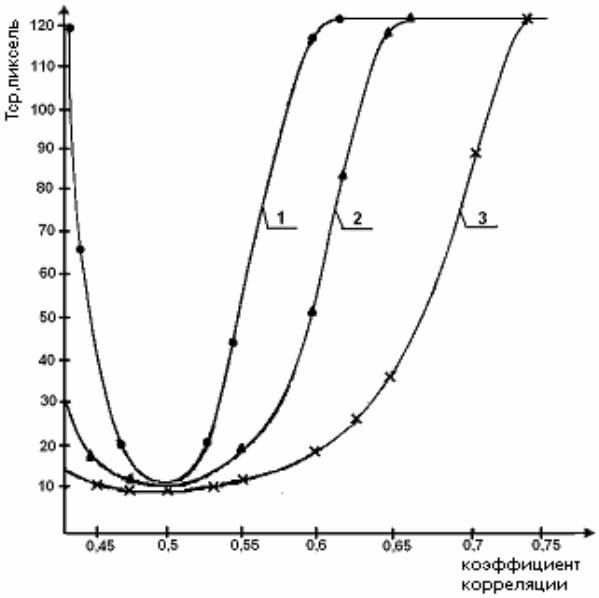


Рис. 7. Зависимость среднего периода колебания автокорреляционной функции от уровня коэффициента корреляции:
1 – образец № 3, 2 – образец № 2, 3 – образец № 1

поверхности достаточно хорошо различаются друг от друга, были построены зависимости Тср=f(r), приведенные на рис. 7.

Как видно из приведенных зависимостей, при изменении коэффициента корреляции в пределах ~ 0,47÷0,53 периоды колебаний автокорреляционных функций для поверхностей с различной шероховатостью отличаются незначительно. С уменьшением коэффициента корреляции ниже значения 0,47 наблюдается увеличение различия в Тср, и для поверхности с наилучшей шероховатостью (кривая 1) этот показатель достигает своего максимального значения Тср=239 пикселей при r=0,41. При этом разрыв в Тср между образцами 2 и 3 составляет ΔТср≈72 пикселя. Это объясняется тем, вся кривая r=f(пиксель) для образца № 3 (рис. 6) находится выше указанного значения r. Отличие же Тср для образцов 1 и 2 на этом уровне r составляет всего 10 пикселей, что сопоставимо со среднеквадратическим отклонением при измерении Тср. При значении r=0.3 средний период колебаний автокорреляционных функций для образцов № 1 и № 2 также становится равным 239 пикселей, то есть и эти колебания r будут происходить выше указанного уровня.

Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей, полученных с помощью преобразования многоградационных (рис. 5) по правилу: Bi=0FFH, если Bi≥105 и Bi=00H, если Bi<105, где 1≤i≤39196 и уровень Bi=105 в исходном изображении соответствует r=0,41, приведены на рис. 8.

Таким образом, если ставится задача выделить только изделия с малой шероховатостью поверхности, то можно задать порог r=0,38÷0,41 и отбраковывать изделия, для которых Тср будет меньше, чем 239 пикселей, то есть весь бинарный кадр автокорреляционной поверхности будет представлять из себя сплошное белое поле с площадью, равной 239x164 пикселя (рис. 8, образец № 3).

Если же ставится задача идентифицировать поверхности с различной шероховатостью, то есть отнести их с заданной вероятностью к тому или иному диапазону шероховатости, то можно воспользоваться значением r=0,61, при котором наблюдается хорошее различие в Тср для исследуемых поверхностей (рис. 7): для образца № 1 – Тср=20 пикселей, для образца №2 – Тср=61 пиксель и для образца № 3 – Тср=119 пикселей. Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей для r=0,61 приведены на рис. 9.

Полученная зависимость среднеарифметического отклонения профиля Ra от среднего периода колебания автокорреляционной функции Тср на уровне r=0,61 приведена на

Рис. 8. Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей для r=0,41

Образец №1 Образец №2 Образец №3

Рис. 9. Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей для r=0,61

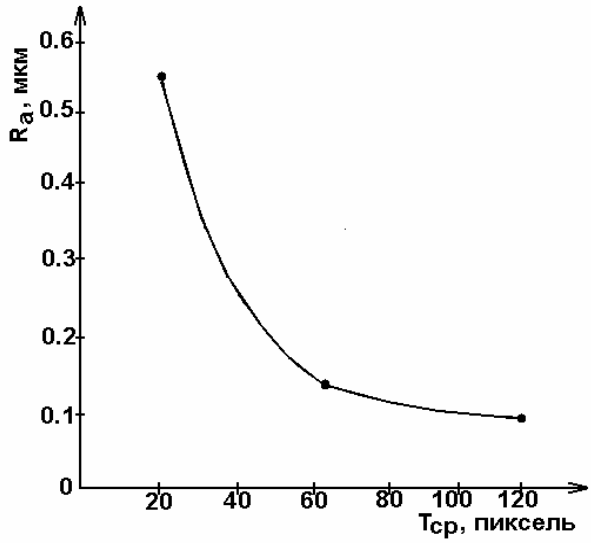


Рис. 10. Зависимость среднеарифметического отклонения профиля от среднего периода колебания автокорреляционной функции при r=0,61

рис. 10. В качестве Ra также брались средние значения, определенные экспериментально для исследуемых образцов.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением шероховатости поверхности уменьшается средний период Tср колебания автокорреляционной функции. Для получения аналитической зависимости Ra=f(Tср) в данной работе был использован интерполяционный метод Лагранжа [4], который позволил получить уравнение для Ra в виде:

$$Ra = (-0{,}145\,Tcp^{3} + 39\,Tcp^{2} - 3458\,Tcp + 112131)\cdot 10^{-5},$$ мкм. (1)

Для определения доверительных интервалов I_b, в которые попадает случайная величина Tср, зададим вероятность распознавания шероховатости поверхности равной P=0,99. Проведенными исследованиями также было установлено, что образец № 1 имел среднеквадратическое отклонение от Tср, равное s=11 пикселей, образец № 2 – s=20 пикселей и образец № 3 – s=1 пиксель, а сама случайная величина Tср подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае число среднеквадратических отклонений t_b, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания случайной величины Tср в полученный интервал была P=0,99, имеет значение 2,576 [5]. Для каждого образца было обработано по 30 изображений с различных участков исследуемой поверхности, т.е. n=30. Тогда среднеквадратическое отклонение оценки для Tср определяется по формуле [5]:

$$\sigma_T = \frac{\sigma_{cp}}{\sqrt{n}}. \qquad (2)$$

Следовательно, для образца № 1 имеем s_T=2, для образца № 2 имеем s_T=3,65 и для образца № 3 имеем s_T=0,18.

Через величин t_b и s_T доверительный интервал выражается в виде:

$$I_b=(Tcp - t_\beta\cdot s_T;\ Tcp + t_\beta\cdot s_T) \qquad (3).$$

Округляя вычисленные значения $I_\beta s_T$ в сторону увеличения, получим:

для образца № 1 I_β=10 пикселей, 15≤Tср≤25 пикселей;

для образца № 2 I_β=20 пиксель, 51≤Tср≤71 пикселей;

для образца № 3 I_β=1 пиксель, 118,5≤Tср≤119,5 пикселей;

Как видно из приведенных данных, доверительный интервал для Tср с уменьшением шероховатости сначала возрастает до 20 пикселей, а затем падает до 1 пикселя. График зависимости I_β=f(Tср) приведен на рис. 11.

Для полученной экспериментальной зависимости I_β=f(Tср) с использованием интерполяционной формулы Лагранжа было най-

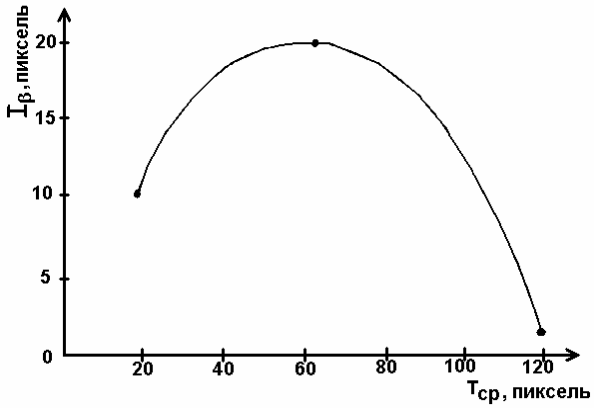


Рис. 11. Зависимость доверительного интервала от среднего периода колебания автокорреляционной функции при r=0,61

дено аналитическое выражение в виде полинома третьей степени:

$$I_\beta = (-1{,}3\,Tcp^3 - 314\,Tcp^2 + 57280\,Tcp - 9600)\cdot 10^{-5},$$ пиксель (4)

Таким образом, определяя с использованием оптико-электронного комплекса и рассмотренной выше методики средний период колебания автокорреляционной функции Tср можно с использованием аналитических зависимостей (1), (3) и (4) вычислить среднеарифметическое отклонение профиля исследуемой поверхности, а также диапазон изменений Ra с заданной вероятностью распознавания. Так, например, если из эксперимента было установлено, что Tср=40 пикселей, а доверительный интервал для этого значения, вычисленный по формуле (4), равен I_β=18 пикселей, то есть Tср.min=31 пиксель, а Tср.max=49 пикселей, то применяя формулу (1) находим, что Ra ср=0,27 мкм, Ra min=0,19 мкм, а Ra max=0,37 мкм. Эти вычисленные значения вполне согласуются с экспериментальными данными, определенными стандартными методами по профиллограммам.

Рассмотренная выше методика была применена для оценки шероховатости цилиндрической поверхности бомбинированного ролика подшипника ступицы колеса автомобиля ВАЗ. Отметим, что исследуемые образцы были изготовлены на том же оборудовании и по той же технологии, что и ролик. Для ролика режим шлифования был следующий: скорость абразивного круга 50 м/с, скорость ведущего круга 70 м/с, снимаемый припуск 0,01 мм, скорость продольной подачи 300 м/мин, работа с охлаждением и периодической правкой алмазным карандашом. Внешний

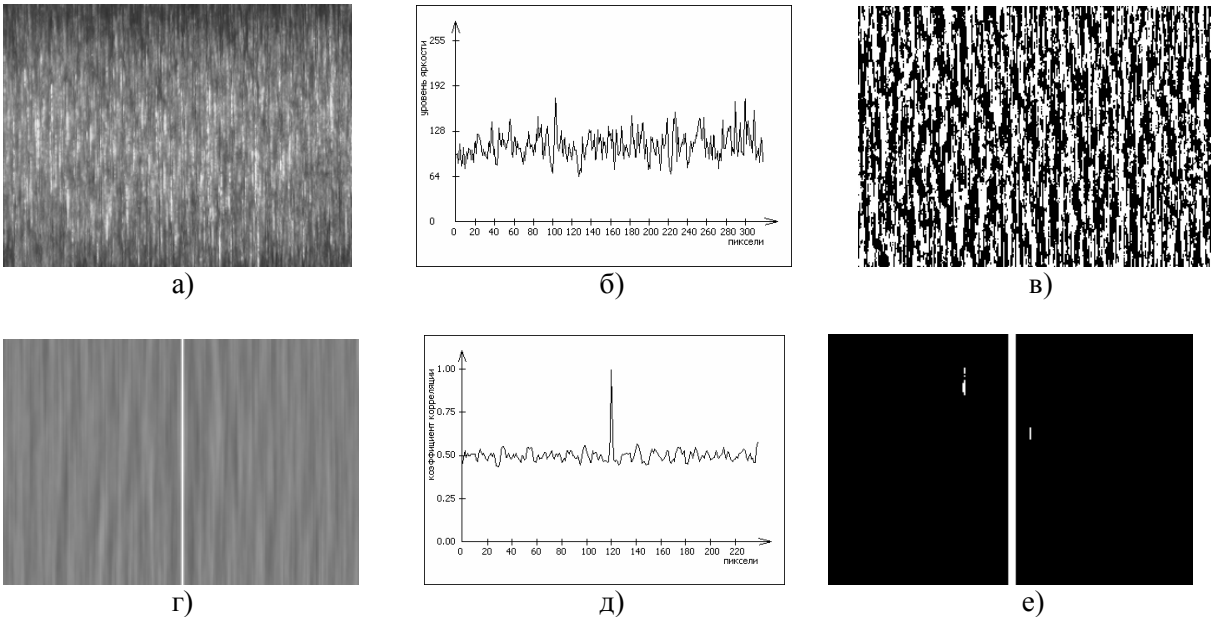
Рис. 12. Внешний вид бомбинированного ролика подшипника

вид ролика приведен на рис. 12.

Видеоизображение участка цилиндрической поверхности ролика, полученное с использованием исследовательского комплекса, а также результаты преобразования этого изображения по рассмотренной выше методике приведены на рис. 13.

Обработка 30 бинарных изображений автокорреляционных поверхностей при r=0,61 дала следующее значение Tср=118 пикселей. Подставляя это значение в формулу (4), получаем I_b= 2 пикселя. Следовательно, Tср min=117 пикселя и Tср max=119 пикселя. Используя эти значения в формуле (1), находим: Ra ср=0,089 мкм, Ra min= 0,085 мкм и Ra max=0,092 мкм. Найденные значения среднеарифметического отклонения профиля цилиндрической поверхности ролика вполне согласуются со значениями, полученными с помощью профилографа модели SJ-201P. Расхождение найденных значений с результатами измерения Ra непосредственно по профилограммам составило около 5%. Это незначительное расхождение можно объяснить тем, что профилограммы дают ограниченную информацию о рельефе всей поверхности, тогда как оптико-электронный комплекс позволяет обрабатывать двухмерные изображения.

Таким образом, рассмотренный оптико-электронный комплекс и методика определения стандартных параметров шероховатости на основе видеоизображений анализируемых участков поверхности позволяют оценивать качество поверхности, не нанося ей механических повреждений и, кроме того, в тех местах, где применение других методов не представляется возможным.



а) б) в)

г) д) е)

Рис. 13. Результаты обработки исходного изображения участка цилиндрической поверхности ролика: а) исходное изображение; б) видеосигнал; в) бинарное изображение; г) автокорреляционная поверхность; д) график изменения коэффициента корреляции; е) бинарное изображение автокорреляционной поверхности на уровне r=0,61

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дунин-Барковский И.В., Карташова А.Н.* Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности. М: Машиностроение, 1987.
2. *Г. Ван Трис*. Теория обнаружения, оценок и модуляции. М.: Советское радио, 1977.
3. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Под ред. *Т.С. Хуанга*. М.: Радио и связь, 1984.
4. *Мышкис А.Д.* Лекции по высшей математике. М.: Наука, 1969.
5. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей. М.: Наука, 1969.

DETERMINATION OF A GRINDING FINISH ROUGHNESS ON BASIS OF ANALYSIS AUTOCORRELATION FUNCTION

© 2008 A.D. Abramov

Samara State Technical University

The new approach to an estimation of a surface microgeometry of details of machines and mechanisms after final polishing is offered in the article. The method based on application of optic-electronic means and computer technologies is laid in the foundation of determination of a microgeometry. Results of an estimation of a surface microgeometry of details after grinding are presented in the article.