

УДК 621.517, 681.142.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ БОМБИНИРОВАННЫХ РОЛИКОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ

© 2009 Н. В. Носов, А. Д. Абрамов, В. И. Хаустов

Самарский государственный технический университет

Предложены новые подходы к оценке шероховатости поверхностей бомбинированных роликов после финишной обработки. В процессе исследования сравнивались два метода. Первый метод традиционный - исследование профилограмм поверхности, второй основан на применении оптико-электронных средств и компьютерных технологий. Приведены результаты сравнения шероховатости поверхности после бесцентрового шлифования абразивными кругами.

Бомбинированные ролики, шероховатость поверхности, профилограмма, автокорреляционная функция, оптико-электронный метод

Качество поверхности бомбинированных роликов с точки зрения шероховатости поверхности во многих случаях является определяющим фактором, влияющим на долговечность и надежность роликовых подшипников при их эксплуатации.

На рис.1 показана конструкция ролика и отмечены участки, на которых записывались профилограммы поверхности. На торцах ролика профилографирование производилось в двух направлениях: в радиальном (1,3) и окружном (2,4).

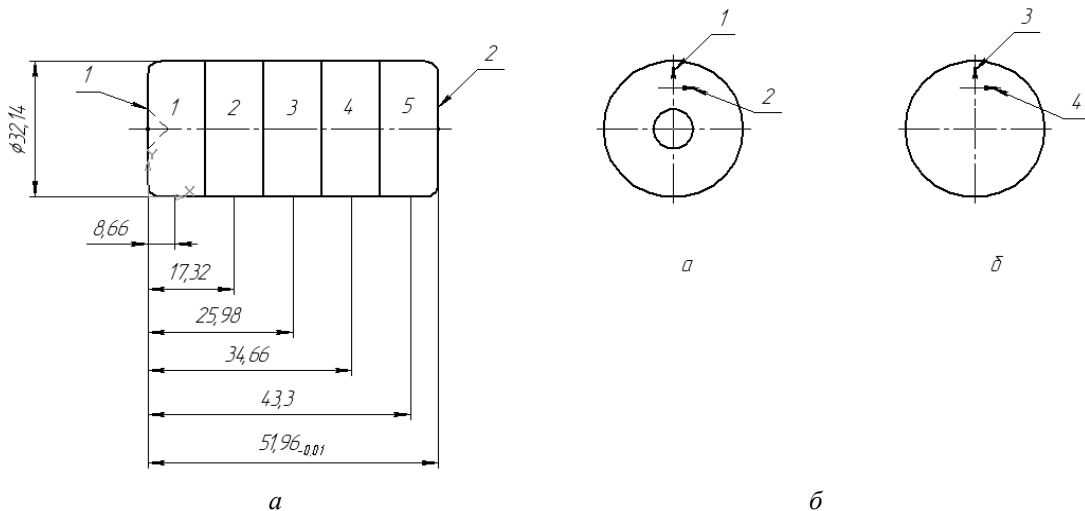


Рис. 1. Бомбинированный ролик: а- торец с центровым отверстием; б- гладкий торец

Технология производства бомбинированных роликов предусматривает на заключительных операциях технологического процесса применение операций шлифования. Окончательную обработку наружной поверхности дорожки качения осуществляют на бесцентрово - шлифовальных станках СВА АКМ 25/1 абразивными кругами на вулканитовых связках (14А 6Н СМ2 В1). Режимы шлифования: скорость круга 55 м/с, скорость вращения ведущего круга 70 м/мин, снимаемый припуск 0.01 мм, скорость

продольной подачи 300мм/мин, работа с охлаждением и правкой алмазным карандашом.

Торцы роликов обрабатываются на двухстороннем торцешлифовальном станке ЗА343 абразивными кругами размером 600×63×305 и характеристиками 14А 25П СМ1 10Б. Обработка производилась с режимами: окружная скорость шлифовального круга 25 м/с, общий припуск 0.01 мм, скорость подачи ролика в зону обработки 2.5 м/мин, шлифование осуществляется с

подачей СОЖ и периодической правкой круга алмазом в оправе.

О качестве поверхности судят по сравнению обработанной поверхности и эталонной, в ряде случаев, выборочно, проводят исследование шероховатости 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 основных параметров шероховатости. На рис. 2 показана типичная профилограмма рабочей поверхности ролика, записанная и обработанная на исследовательском комплексе, включающим профилограф - профилометр и компьютер.

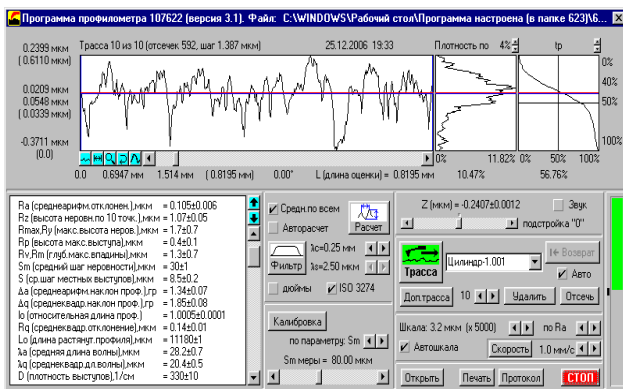


Рис. 2. Профилограмма поверхности ролика и параметры шероховатости ее поверхности

Обработка профилограммы поверхности осуществлялась с помощью компьютерной программы, которая позволяет определить 6 высотных параметров, 5 шаговых параметров и остальные параметры, 4 комплексных параметра.

Исследования высоты шероховатости показало, что параметр R_a изменяется по рабочей поверхности ролика незначительно

и подчиняется линейному закону распределения (рис 3).

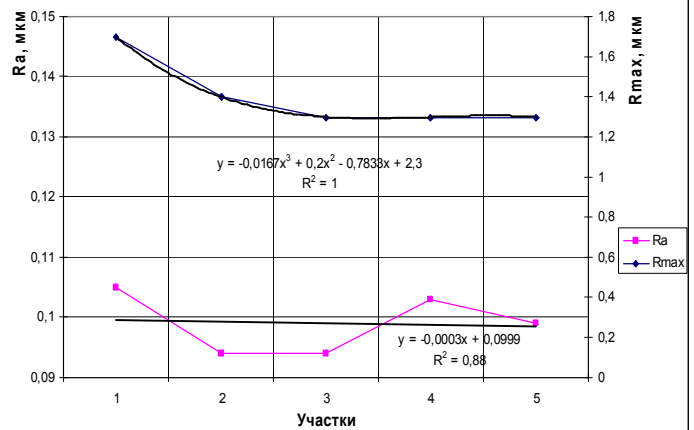


Рис. 3. Зависимость участков профиля от параметров шероховатостей R_a и R_{max}

В то же время величина R_{max} изменяется по длине ролика. Это связано с двумя причинами. С одной стороны, на величину R_{max} большое влияние оказывает технологическая наследственность, а с другой - изменения условий контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью, о чем свидетельствует наличие отдельных рисков, образующихся при выходе ролика из зоны обработки. Однозначно сложно сказать, какой из этих факторов превалирует. Для этого необходимо проанализировать параметры, характеризующие форму микронеровностей, и, в частности, параметры начального участка кривых опорного профиля v и b . Как правило, увеличение значений v и b свидетельствует о повышении роли пластической деформации при обработке поверхности.

Исследованиями установлено (рис. 4), что параметр v по длине профиля ролика практически не меняется и составляет 2.0 – 2.5, а параметр b изменяется от 2.0 до 4.2. Повышение величины b до 4.2 свидетельствует о значительной доле пластического оттеснения материала при работе абразивного зерна в зонах 1, 2 и 3. В этих же точках повысилась величина R_{max} , поэтому можно с уверенностью сказать, что повышение шероховатости связано с изменением условий работы зерен и повышением доли пластического оттеснения материала относительно резания.

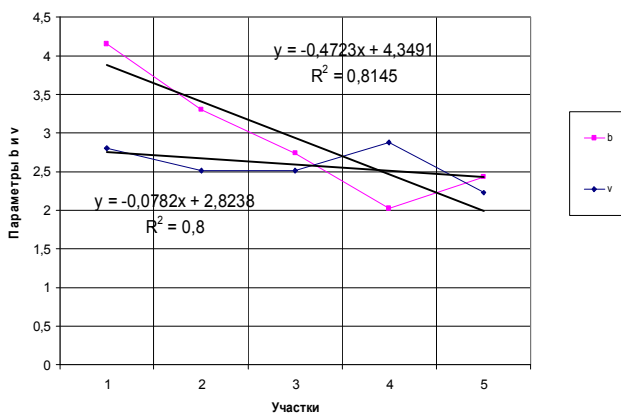


Рис. 4. Зависимость участков профиля от параметров шероховатостей v и b

Исследование параметров шероховатости поверхности торцов роликов показало, что величины R_a и R_{max} , измеренные во взаимно перпендикулярных направлениях не отличаются друг от друга (см. рис. 5 и 6).

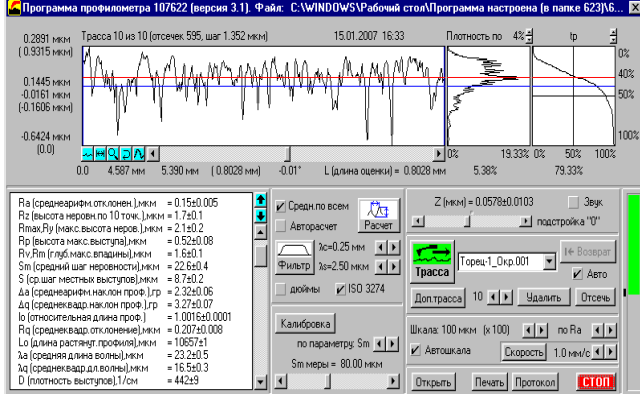


Рис. 5. Шероховатость поверхности торца ролика 1 в радиальном направлении

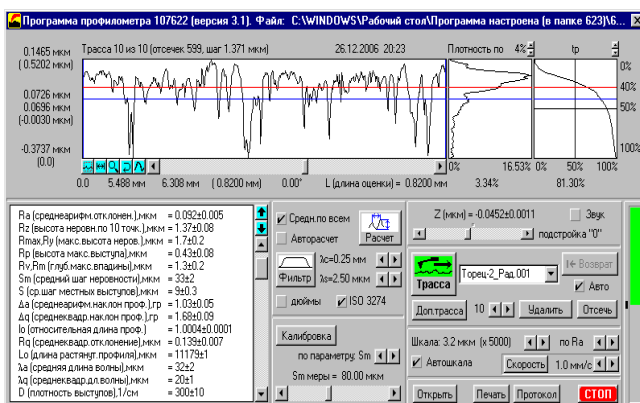


Рис. 6. Шероховатость поверхности торца ролика 2 в осевом направлении

Однако на разных торцах формируется различная шероховатость. Установлено, что на торце 1 величина R_a составила 0,13 мкм (в радиальном) и $R_a=0,15$ мкм (в осевом), в то

же время на торце 2 величина R_a составила 0,09 мкм (в радиальном) и $R_a=0,105$ мкм (в осевом). Это связано с тем, что угол захода конуса на шлифовальных кругах разный, и в результате с обрабатываемой поверхности снимается различный припуск, т.е. можно с уверенностью сказать, что с торца 1 снимается больший припуск (рис. 7).

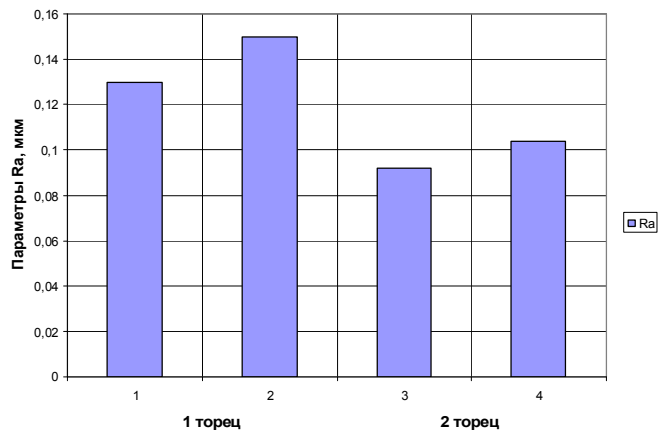


Рис. 7. Шероховатость поверхности торцов роликов

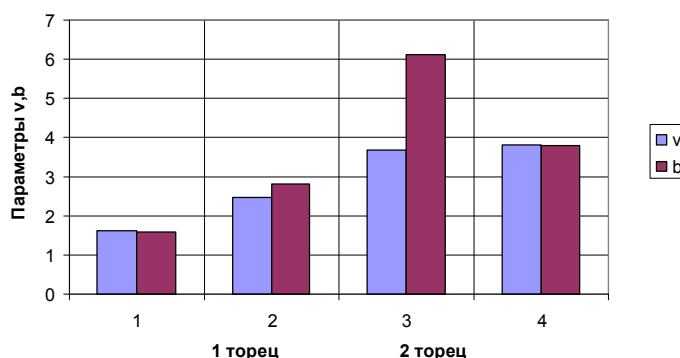


Рис. 8. Параметры относительной опорной поверхности торцов роликов

Исследования параметров относительной опорной поверхности торцов роликов показали, что с точки зрения формы микронеровностей на торцах получены принципиально разные поверхности. Предпочтительной является поверхность, сформированная на торце 2, т.к. параметры v и b в 2 – 2,5 раза больше, чем на торце 1, что говорит о большей контактной жесткости данной поверхности.

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 роликов ограниченных размеров и, как правило, имеющих простые поверхности: плоская, цилиндрическая, но не сложная бомбинированная;

– профилограммы не дают комплексной оценки распределения микронеровностей по поверхности роликов;

Исследование шероховатости профилей поверхности роликов не дает объективной картины величины распределения шероховатости по всей поверхности, поэтому необходимо при оценке микрогеометрии поверхности применить комбинацию методов щупового и оптического.

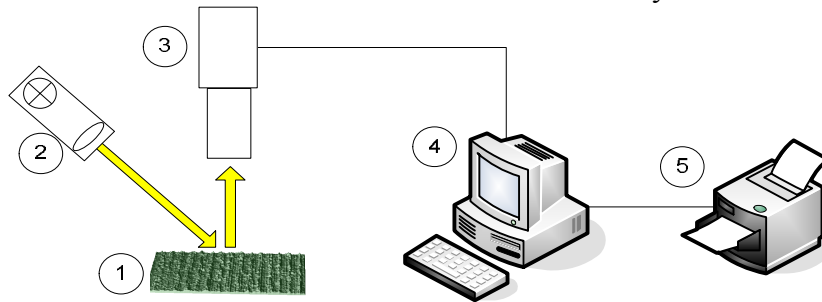


Рис. 9. Схема исследовательского комплекса: 1 – исследуемая поверхность; 2 – источник параллельного светового потока; 3 – видеокамера; 4 – компьютер; 5 – принтер

В работе предложен новый метод оценки шероховатости поверхности с помощью исследовательского комплекса, который включает оптико-электронные средства (рис. 9) и программное обеспечение, позволяющее обрабатывать видеоизображения исследуемых поверхностей в соответствии с методикой, изложенной ниже.

В качестве исследуемых поверхностей были взяты бомбинированные ролики с различной шероховатостью.

Для этих же роликов были записаны профилограммы и определены стандартные

параметры шероховатости, значения которых приведены выше.

Оптико-электронная система комплекса была настроена таким образом, что анализируемая поверхность эталонных образцов имела размер $3 \times 2,5$ мм. Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом 45° . Формат видеокadra, записываемого в память компьютера, составлял 320×240 пикселей. Видеоизображения этих поверхностей приведены на рис.10.

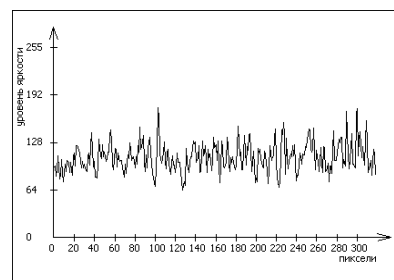
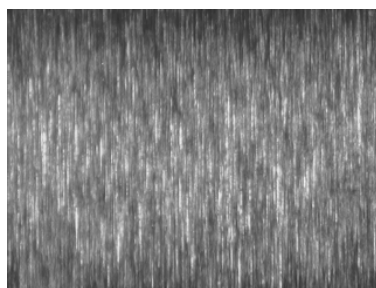


Рис. 10. Видеоизображения исследуемых поверхностей роликов (а) и изменение уровня яркости (б)

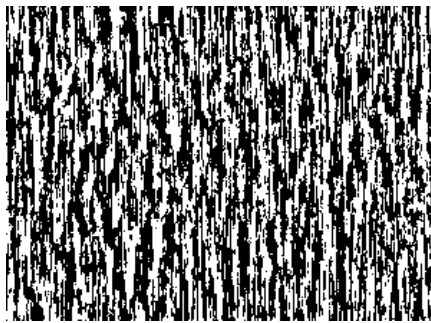
В полученных видеоизображениях исследуемых поверхностей на каждый пиксель отводилось 3 байта. Следовательно, при использовании черно-белой видеока-

меры полученная информация является избыточной. В связи с этим на первом этапе было выполнено преобразование исходного изображения поверхности с помощью

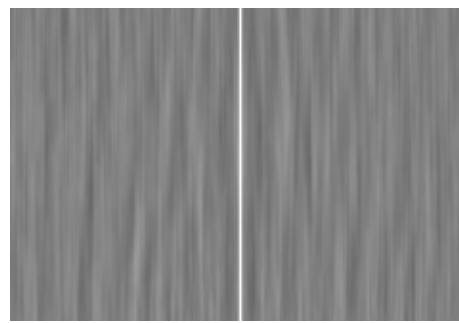
специально разработанной программы в формат 1 пиксель – 1 байт и при этом удалялся заголовок файла в исходном изображении. Таким образом, диапазон изменения видеосигнала по яркости составил 0 – 255 условных единиц. Характерные по строке видеокadra поверхности исследуемых образцов приведены на рис. 10, б.

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, которая существенно отличается от методики, приведенной в работе [2]. Многоградационное по яркости черно-белое изображение преобразовывалось в бинарное по следующему алгоритму. Начиная с левого верхнего угла в исходном изображении задавалось окно

размером 21×21 пиксель, и в этом окне подсчитывался средний уровень яркости B_{cp} . С этим уровнем яркости сравнивалось значение яркости B_i центрального элемента этого окна и производилось его преобразование по правилу: $B_i=0FFH$, если $B_i \geq B_{cp}$ и $B_i=00H$, если $B_i < B_{cp}$. После этого окно перемещалось на 1 пиксель вправо и производилось преобразование следующего центрального элемента в этом окне. Закончив преобразование в полосе 320×21 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 300×320 пикселей.



а



б

Рис.11. Бинарное изображение исследуемых поверхностей ролика (а) и нормированная автокорреляционная поверхность (б)

Полученные бинарные изображения (рис. 11,а) 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 320×55 пикселя. По центру этой полосы задавался эталон размером 60×55 пикселя. Оптимальный размер эталона был найден экспериментально. Этот эталон перемещался по всей выделенной полосе с шагом в 1 пиксель. При каждом совмещении эталона с текущим фрагментом бинарного изображения подсчи-

тывалась 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 240×165 пикселей было 165 штук, а количество найденных коэффициентов корреляции в полосе составило 180 значений. Таким образом, после обработки всего бинарного кадра получалась многоградационная автокорреляционная поверхность размером 180×165 байт (рис. 11 б). Характерные изменения нормированных корреляционных сигналов приведены на рис.12.

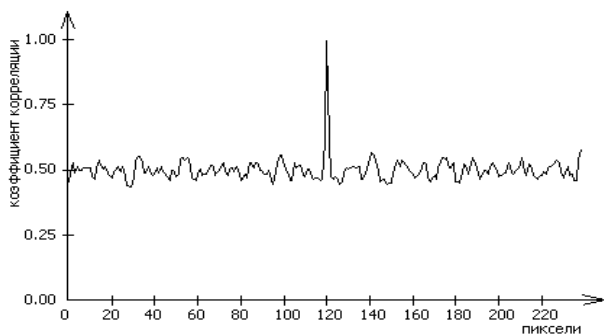


Рис. 12. График изменения нормированных корреляционных сигналов исследуемой поверхности ролика

Их анализ показывает, что в отличие от изменения уровня яркости видеосигналов наблюдается четкая тенденция к увеличению периода корреляционного сигнала с уменьшением шероховатости для шлифован-

ных образцов, а для полированного образца и зеркала — резкое падение амплитуды сигнала с удалением от места взятия эталона. Это также свидетельствует о том, что в этих образцах резко возрастает доля случайной компоненты. Для более четкого выделения отмеченного признака была предложена следующая методика.

Автокорреляционные поверхности, приведенные на рис.12, также преобразовывались в бинарные. При этом, если исходный пиксель был равен или больше 155 усл. ед., что соответствует коэффициенту корреляции 0,61, то его значение принималось равным $\emptyset FFH$, если меньше 128 усл. ед., то ему ставилось в соответствие значение $\emptyset H$.

Отметим, что в бинарных автокорреляционных поверхностях также наблюдается направленность процесса резания, в которой чередуются черные и белые полосы. При этом у шлифованных поверхностей роликов текстура носит более регулярный характер, особенно у образцов с большей шероховатостью. Для получения статистической информации о распределении периодов изменения коэффициентов корреляции на уровне 0,61 по всему бинарному изображению была разработана соответствующая программа. Характерные изменения нормированных корреляционных сигналов приведены на рис. 13.

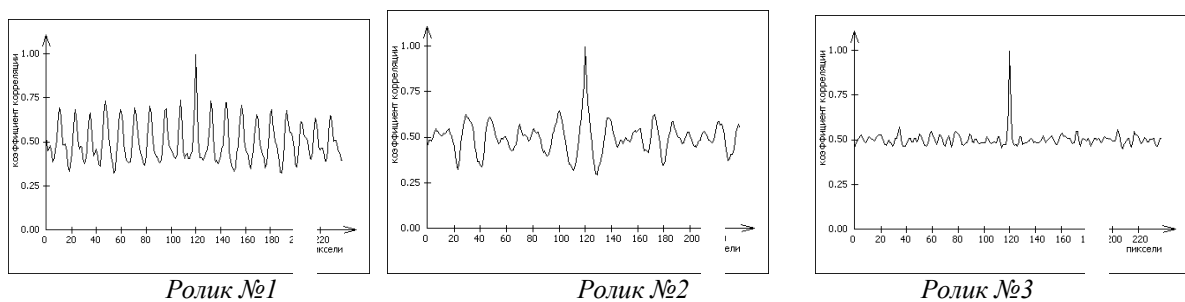


Рис. 13. Графики изменения нормированных корреляционных сигналов исследуемых поверхностей

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 (ролик № 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, по

которому исследуемые поверхности достаточно хорошо различаются друг от друга, были построены зависимости $T_{cp}=f(r)$, приведенные на рис. 14.

Как видно из приведенных зависимостей, при изменении коэффициента корреляции в пределах $\sim 0,47 \div 0,53$ периоды колебаний автокорреляционных функций для поверхностей с различной шероховатостью отличаются незначительно. С уменьшением коэффициента корреляции ниже значения 0,47 наблюдается увеличение различия в T_{cp} , и для поверхности с наилучшей шероховатостью (кривая 1) этот показатель достигает своего максимального значения $T_{cp}=240$ пикселей при $r=0,41$. При этом разрыв в T_{cp} между образцами 2 и 3 составляет $\Delta T_{cp} \approx 72$ пикселей. Это объясняется тем, вся кривая $T_{cp}=f(r)$ (см. рис. 13) находится выше указанного значения r . Отличие же T_{cp} для образцов 1 и 2 на этом уровне r составляет всего 10 пикселей, что сопоставимо со среднеквадратическим отклонением при измерении T_{cp} . При значении $r=0,3$ средний период колебаний автокорреляционных функций для образцов № 1 и № 2 также становится равным 240

пикселей, то есть и эти колебания r будут происходить выше указанного уровня.

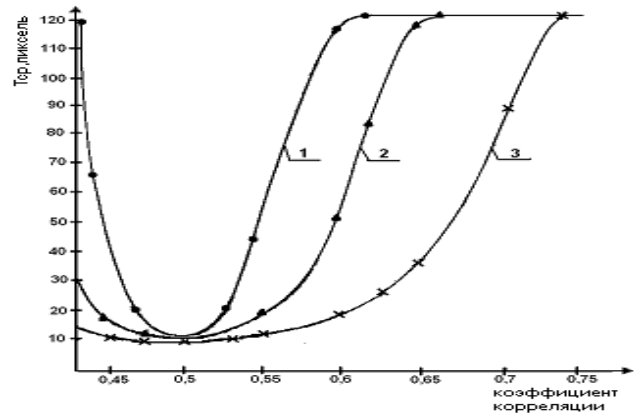


Рис. 14. Зависимость среднего периода колебания автокорреляционной функции от уровня коэффициента корреляции: 1 – ролик № 3; 2 – ролик № 2; 3 – ролик № 1

Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей, полученных с помощью многоградационных преобразований по правилу: $B_i=0FFH$, если $B_i \geq 105$, и $B_i=00H$, если $B_i < 105$, где $1 \leq i \leq 39600$ и уровень $B_i=105$ [3] в исходном изображении соответствует $r=0,41$, приведены на рис. 15.



Ролик №1

Ролик №2

Ролик №3

Рис. 15. Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей для $r=0,41$

Таким образом, если ставится задача выделять только ролики с шероховатостью поверхности, заданной техническими условиями, то можно задать порог $r=0,38 \div 0,41$ и отбраковывать ролики, для которых T_{cp} будет меньше, чем 240 пикселей.

Если же ставится задача идентифицировать поверхности роликов 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 T_{cp} для исследуемых поверхностей (см. рис. 7): для ролика № 1 – $T_{cp}=20$ пикселей, для ролика № 2 – $T_{cp}=63$ пикселя и для ролика №3 – $T_{cp}=120$ пикселей. Бинарные изображения автокорреляционных поверхностей для $r=0,61$ приведены на рис. 16.

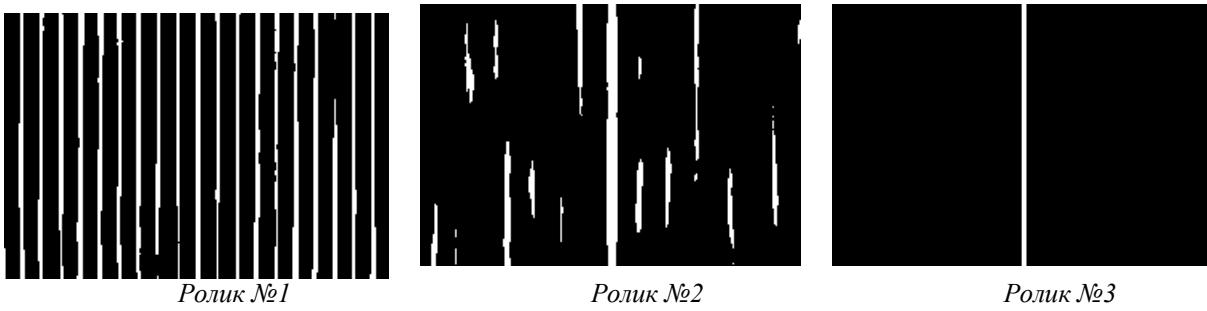


Рис. 16. Бинарные изображения двумерных автокорреляционных поверхностей для $r=0,61$

Полученная зависимость среднеарифметического отклонения профиля поверхности R_a от среднего периода колебания автокорреляционной функции T_{cp} на уровне $r=0,61$ приведена на рис. 17. В качестве R_a также брались средние значения, определенные экспериментально для исследуемых роликов.

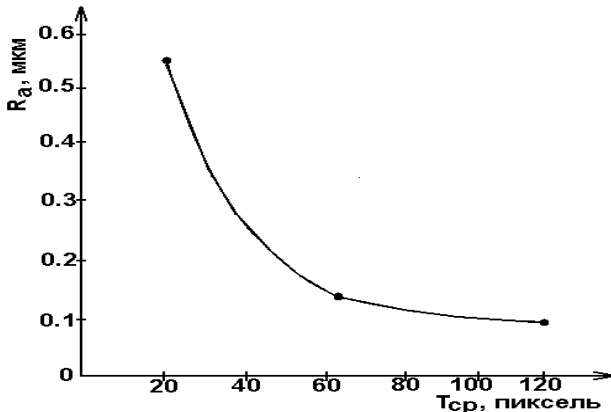


Рис. 17. Зависимость среднеквадратического отклонения профиля от среднего периода колебания автокорреляционной функции при $r=0,61$

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением шероховатости поверхности уменьшается средний период T_{cp} колебания автокорреляционной функции. Для получения аналитической зависимости $R_a=F(T_{cp})$ в данной работе был использован интерполяционный метод Лагранжа, который позволил получить уравнение для R_a в виде:

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

Для определения доверительных интервалов I_β , в которые попадает случайная величина T_{cp} , зададим вероятность распознавания шероховатости поверхности равной $P=0,99$. Проведенными исследованиями также было установлено,

что образец №1 имел среднеквадратическое отклонение от T_{cp} , равное $\sigma = 11$ пикселей, образец № 2 - $\sigma = 20$ пикселей и образец № 3 - $\sigma = 1$ пиксель, а сама случайная величина T_{cp} подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае число среднеквадратических отклонений t_β , которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания случайной величины T_{cp} в полученный интервал была $P=0,99$, имеет значение 2,576. Для каждого ролика было обработано по 30 изображений с различных участков исследуемой поверхности, т.е. $n=30$. Тогда среднеквадратическое отклонение оценки для T_{cp} определяется по формуле

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

Следовательно, для ролика № 1 имеем $\sigma_T=2$, для ролика № 2 имеем $\sigma_T=3,65$, и для ролика № 3 имеем $\sigma_T=0,18$.

Через величины t_β и σ_T доверительный интервал выражается в виде

$$I_\beta = (T_{cp} - t_\beta \cdot \sigma_T; T_{cp} + t_\beta \cdot \sigma_T). \quad (3)$$

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

для ролика № 1 $I_\beta=10$ пикселей, $15 \leq T_{cp} \leq 25$ пикселей;

для ролика № 2 $I_\beta=20$ пиксель; $51 \leq T_{cp} \leq 71$ пикселей;

для ролика № 1 $I_\beta=1$ пиксель. $119,5 \leq T_{cp} \leq 120,5$ пикселей;

Как видно из приведенных данных, доверительный интервал для T_{cp} с уменьшением шероховатости сначала возрастает до 20 пикселей, а затем падает до 1 пикселя. График зависимости $I_\beta=f(T_{cp})$ приведен на рис. 18.

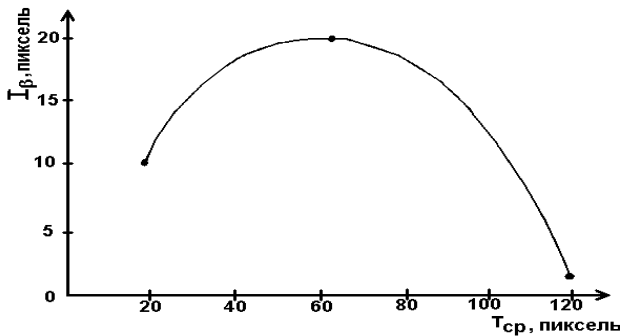


Рис. 18. Зависимость доверительного интервала от среднего периода колебания автокорреляционной функции при $r=0,61$

Для полученной экспериментальной зависимости $I_{\beta}=f(T_{cp})$ с использованием интерполяционной формулы Лагранжа было найдено аналитическое выражение в виде полинома третьей степени:

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

Таким образом, определяя с использованием оптико-электронного комплекса и рассмотренной выше методики средний период колебания автокорреляционной функции T_{cp} можно с использованием аналитических зависимостей (1), (3) и (4) вычислять среднеквадратическое отклонение профиля исследуемой поверхности, а также диапазон изменений R_a с заданной вероятностью распознавания. Так, например, если из эксперимента было установлено, что $T_{cp}=40$ пикселей, а доверительный интервал для этого значения, вычисленный по формуле (4), равен $I_{\beta}=18$ пикселей, то есть $T_{cp.min}=31$ пиксель, а $T_{cp.max}=49$ пикселей, то применяя формулу (1) находим, что $R_{a\ cp}=0,27$ мкм, $R_{a\ min}=0,19$ мкм,

а $R_{a\ max}=0,37$ мкм. Эти вычисленные значения вполне согласуются с экспериментальными данными, определенными стандартными методами по профилограммам.

Библиографический список

1. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. - М: Машиностроение, 1987. – 232с.
2. Абрамов, А.Д. Бесконтактный метод оценки шероховатости поверхности крупногабаритных деталей / А.Д. Абрамов, Н.В. Носов // Высокие технологии в машиностроении: матер. междунар. науч.-техн. конф. Самара, 2005.
3. Солонина, А.И. Основы цифровой обработки сигналов / А.И. Солонина, Д.А. Удахович [и др.]. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 600 с.

References

1. Dunin-Barkovskij I.V., Kartashova A.N. Measurement and Analysis of Roughness and Sinuosity of Surfaces.-Moscow: Mechanical engineering, 1987.-p.232.
2. Abramov A.D., Nosov N.V. Contactless's Method of Estimation of Roughness of surface on Large-Sized Details. Materials of the international scientific and technical conference «High Technologies in Mechanical Engineering». – Samara 2005.
3. Solonina A.I., Udahovich D.A., etc. Basis of Digital Processing of Signals – St.Petersburg, 2003.-p. 600

RESEARCH OF ROUGHNESS OF SURFACE ROLLERS WITH MODIFIED CONTACT ON THE BASIS OF ANALYSIS OF THEAR AUTOCORRELATION FUNCTIONS

©2009 N. V. Nosov, A. D. Abramov, V. I. Haustov

Samara State Technical University

New approaches to estimation of a roughness of rollers' surfaces after finishing processing are offered in the article. During research two methods were compared. The first method is traditional – researching the profile of the surfaces. The second is based on application of optical-electronic means and computer technologies. Results of comparison of a roughness of a surface after grindings by abrasive circles are presented.

A rollers with modified contact, a roughness surfaces, section gag log, autocorrelation function, optical-electronic method

Информация об авторах

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, декан машиностроительного факультета, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», Самарского государственного технического университета. E-mail: nosov@samgtu.ru. Область научных интересов: технологическое обеспечение качества и точности поверхности.

Абрамов Алексей Дмитриевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронных систем и информационной безопасности Самарского государственного технического университета. E-mail: nosov@samgtu.ru. Область научных интересов: электронно-измерительные системы управления и программирование.

Хаустов Вячеслав Иванович, технический директор СПЗ-9, соискатель кафедры «Технология машиностроения». E-mail: nosov@samgtu.ru. Область научных интересов: технология обработки и сборки высокоточных подшипников.

Nosov Nikolay Vasilevich, Doctor of Engineering Science, Professor, the Dean of Machine-building Faculty, Managing faculty «Technology of mechanical engineering», Samara State Technical University. E-mail: nosov@samgtu.ru. Area of research: technological maintenance of quality and accuracy of a surface.

Abramov Alexey Dmitrievich, Candidate of Engineering Science, Senior lecturer of faculty «Electronic systems and information safety» of Samara State Technical University. E-mail: nosov@samgtu.ru. Area of research: electronic-measuring control systems and programming.

Hauستov Vyacheslav Ivanovich, Technical director SPZ-9, a competitor of department is «Technology of engineer». E-mail: nosov@samgtu.ru. Area of research: technology of processing and assembly of precision bearings.