

УДК 62-408.8 : 531.4

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2022 С.Р. Абульханов

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 15.02.2022

Вводятся комбинаторные параметры, с помощью которых характеризуются микронеровности на растровом изображении фрагмента шероховатой поверхности. Значения параметров определяются с помощью преобразованного изображения шероховатой поверхности. Предложенные параметры характеризуют площадь каждого уровня микронеровностей. Динамика изменения шероховатой поверхности в результате технологического воздействия на неё оценивается с помощью экономичности заполнения и экономичности покрытия. Для параметризации контролируемого фрагмента поверхности также использовались особенности алгоритма преобразования растрового изображения. Для изображения пера лопатки ГТД на разных этапах её чистовой обработки были определены введенные параметры изображения шероховатой поверхности. Показаны границы применимости предложенных параметров для контроля за динамикой изменений шероховатой поверхности. Указаны пути развития предложенных параметров для шероховатых поверхностей, работающих в различных условиях.

Ключевые слова: шероховатая поверхность, растровое изображение, экономичность заполнения, экономичность покрытия, открытые и закрытые прямоугольники преобразованного изображения.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-114-122

ВВЕДЕНИЕ

Изучение свойств поверхности твердого тела вызывает интерес специалистов разных областей знания. Для придания поверхности требуемых эксплуатационных свойств с помощью различных методов воздействия, необходимо обеспечить достоверный контроль того, как эти свойства изменяются в процессе эксплуатации поверхности.

Экспериментально во многих исследованиях было установлено, что характер и уровень шероховатости поверхности влияют на многие эксплуатационные свойства деталей, среди которых можно назвать усталостную выносливость [1], коррозионную стойкость [2], износостойкость [3], определяют также адгезионные свойства [4], герметичность при сопряжении поверхностей [5] и многие др.

Шероховатость поверхности может быть рассмотрена в рамках термодинамики, как граница раздела гомогенной системы (воздушной среды) и гомогенной смеси, например, сплава металлов. В качестве фаз гомогенной смеси могут быть различные по химическому составу вещества, из которых состоит сплав детали, содержащие дефекты кристаллического строения, поры, адсорбированные атомы и т.д. На очень малых расстояниях от геометрической поверхности, отделяющей одну фазу от другой, физические и

химические свойства веществ существенно отличаются от их аналогичных свойств в макроскопических фазах [6]. По этой причине на поверхности раздела фаз имеют место остаточные напряжения, при этом вещество объема фаз, обусловленных различными структурными изменениями, имеет различную микротвердость. Кроме того, между различными фазами происходит непрерывный обмен веществом и энергиями. По этим причинам шероховатость поверхности будет иметь различную способность к деформированию по глубине формирующих её микронеровностей. Все эти обстоятельства приводят к переменной жесткости поверхности при сопряжении её с другой поверхностью.

Упругие контактные перемещения складываются из деформаций микровыступов, деформаций основания под ними и из общих контактных деформаций, которые приводят к изменению характера посадки, вызывают кромоочные давления, пластические деформации, выдавливание смазки и в связи с этим ведут к увеличению сил трения и массового износа. Способность поверхностного слоя контактирующих тел сопротивляться действию сил, стремящихся их деформировать, оценивается параметром шероховатости tp (относительная опорная длина профиля). Считается: параметр относительной опорной длины профиля комплексно характеризует высоту и форму неровностей профиля и позволяет судить о фактической площади контакта при сопряжении поверхностей на заданном уровне сечения p [7].

Абульханов Станислав Рафаелевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий производства двигателей. E-mail: abulkhanov.sr@ssau.ru

Допускаемые отклонения горизонтальных увеличений от номинальных значений, согласно п. 2.3.6. ГОСТ 19300-86, для профилографа-профилометра первого класса точности составляет $\pm 5\%$. В соответствии с ГОСТ 2789-73 для определения tp на профилограмме измеряют сумму величин горизонтальных отрезков, отсекаемых на профиле микронеровностей горизонтальными линиями различных уровней. Это указывает на аддитивность погрешности профилометра при определении величины tp . По этой причине отклонения от истинного значения tp при определении относительной опорной длины профиля $\gg \pm 5\%$. Такая точность не всегда приемлема.

В работе [8] было установлено, что на усталостную выносливость лопатки ГТД среди прочих технологических факторов влияет определённый характер профилограммы шероховатости пера лопатки, который кроме Rz и Ra необходимо также характеризовать параметром tp . Характер шероховатости, представляющий из себя «холмистый рельеф с отдельными кратерами круглой и овальной формы размерами от 3 до 20 мкм, со следами выпучивания на краях», обеспечивал наименьший разброс величины предела усталостной выносливости относительно средней её величины. Известные и доступные средства измерения уровня шероховатости [9-17] не позволяли параметризовать такой характер микронеровностей на поверхности.

Цель работы – определение параметров шероховатой поверхности, которые измеряются на изображении шероховатой поверхности и могут использоваться при исследовании микрорельефа поверхности.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Параметризация шероховатой поверхности в условиях серийного производства, а также в процессе эксплуатации изделий машиностроения является актуальной задачей, которая не имеет удовлетворительного решения.

Использование профильного метода неприемлемо в большинстве случаев, поскольку требует продолжительной юстировки измерительного прибора. При этом использование профилографа-профилометра возможно при соблюдении жестких требований к условиям проведения измерений. Кроме того, контроль шероховатости поверхности детали агрегата требует зачастую его демонтаж. Последнее обстоятельство невозможно при контроле шероховатости, например, поверхности пера лопатки на эксплуатируемом ГТД.

Главный недостаток профильного метода состоит в том, что профилограмма несет информацию о сечении микрорельефа поверхности. Такие эксплуатационные свойства, как коррозионная стойкость, герметичность сопряжения поверх-

ностей, массовая износостойкость, сопротивление усталостному разрушению и многие другие определяются распределением на поверхности микронеровностей определенной формы [18]. Сложившаяся технологическая практика показала эффективность использования профильного метода на этапе изготовления детали, когда режимы технологического воздействия формируют микронеровности поверхности.

Для исследования динамики изменения шероховатости в процессе изготовления детали и в процессе её эксплуатации целесообразно использовать цифровое изображение контролируемой поверхности. Для исключения помех на изображении условия визуальной фиксации шероховатой поверхности должны быть неизменными во времени.

Для уменьшения размерности задачи параметризации шероховатой поверхности рассматривались черно-белые изображения.

Использование для параметризации изображения гистограммы яркости пикселей, не всегда оправдано, поскольку сложно зафиксировать визуально малые изменения значений гистограммы. Кроме того, нет методик формирования гистограммы некоторой эталонной шероховатой поверхности.

В работах [19-21] предложена методика визуализации нормированной гистограммы $\{S_i, i = \overline{1, n}\}$ изображения в виде, адаптированного к восприятию окружающего мира зрением человека. Методика позволяет фиксировать визуально изменение яркости или утрату на изображении одного пикселя. Точность методики составляет 0,001 % [21, 22]. Преобразование изображения фрагмента шероховатой поверхности (далее упаковка) реализуется размещением ортогонально и без пересечений в квадрате S площадью 2 последовательности квадратов $\{S_i, i = \overline{1, n}\}$, суммарная площадь которых для нормированной гистограммы равна 1.

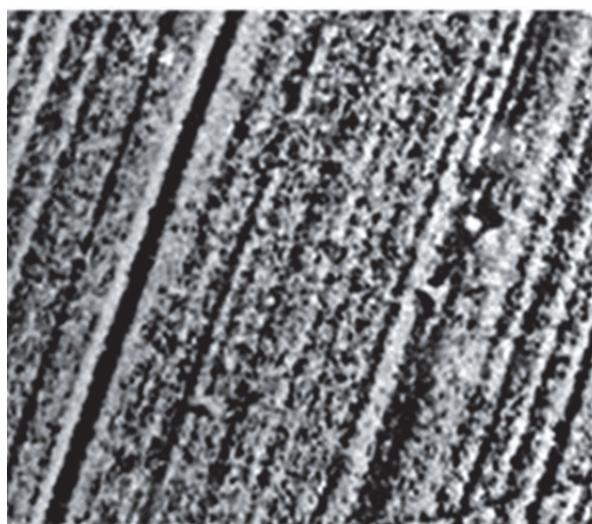
Для отслеживания динамики изменений на изображении предлагается введение параметров, значения которых определялись на основе анализа преобразованного изображения шероховатой поверхности [19]. Особенностью этих параметров является сложность их сопоставления с существующими параметрами шероховатости, регламентируемыми нормативными документами. Одним из путей повышения достоверности параметров, вычисляемых с помощью преобразованного изображения шероховатости, является введение следующих количественных мер в соответствии с работами [19-20, 23-24]:

- наличие и количество открытых и закрытых прямоугольников при упаковке [20];
- экономичность заполнения и экономичность покрытия [25].

Алгоритм упаковки [20] квадрата \mathbb{S} последовательностью квадратов $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ предусматривает разбиение свободной от квадратов s_i площади на прямоугольники. При этом считалось, что прямоугольник закрытый, если после его формирования в дальнейшем в него не размещается ни один квадрат s_i . Прямоугольник считается открытым, если в процессе упаковки в него помещается некоторый квадрат последовательности $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$. Дополнительным параметром, характеризующим преобразованное изображение шероховатой поверхности, может быть количество прямоугольников, которые расположены вертикально и горизонтально.

На рис. 1 показаны изображение шероховатой поверхности пера ГТД лопатки после полирования и преобразованное изображение этого же фрагмента шероховатой поверхности.

Для определения экономичности заполнения и экономичность покрытия отметим, что последовательность квадратов $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ ограничена снизу $s_i \geq 0$ и сверху $s_i \leq 1$. Такая последовательность в соответствии с [25] является нормальной. Пусть в результате размещения квадратов $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ в квадрате \mathbb{S} формируется прямоугольник T , в котором размещены квадраты s_i . Тогда T_k – это площадь наименьшего подобного T прямоугольника, который можно полностью покрыть без пересечений первыми k квадратами последовательности $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$, а t_k – площадь наибольшего подобного прямоугольника. Обозначим общую сумму площадей первых k квадратов последовательности $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ через σ_k , тогда величина $w = \lim_{k \rightarrow n} \frac{\sigma_k}{T_k} > 0$ есть экономичность заполнения, а $W = \lim_{k \rightarrow n} \frac{t_k}{\sigma_k} \leq 1$ – экономичность покрытия.



a

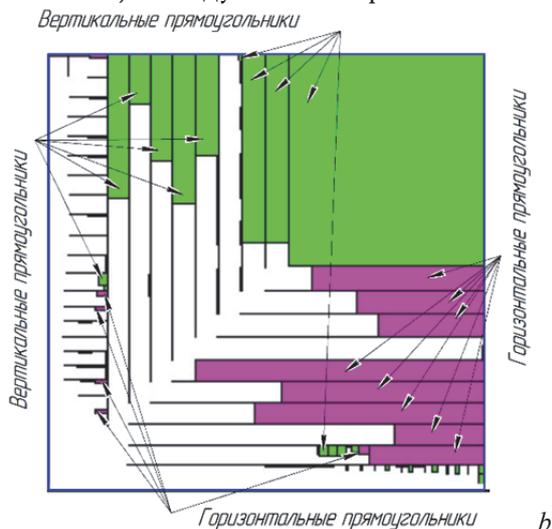
Для наблюдения и контроля за изменениями на изображении шероховатой поверхности необходимо ввести эталон шероховатой поверхности, для которой параметры w и W можно определить аналитически. Это возможно, если последовательность $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ будет состоять из элементов упорядоченной по убыванию последовательности Фибоначчи, каждый из которых отнесен к сумме элементов последовательности $(\sum_{i=1}^n s_i)$.

На рис. 2 показано размещение последовательности квадратов $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$ в квадрате \mathbb{S} при условии, что каждый элемент последовательности s_i является элементом нормированной последовательности Фибоначчи [26]. Далее такую последовательность будем обозначать $\{f_i, i = \overline{1, n}\}$. Также на рис. 2 показан алгоритм заполнения квадрата \mathbb{S} квадратами f_i для различной длины последовательности $\{f_i, i = \overline{1, n}\}$ или, что одно и то же, для различной глубины яркости пикселей изображения. На рис. 2 также показано формирование закрытого и открытого прямоугольников.

МЕТОДИКА

В условиях производства лопаток ГТД для контроля шероховатой поверхности использовался инструментальный микроскоп Zeiss Supra 40, который способен фиксировать изображение шероховатости, как растровую черно-белую картинку. Размер наименьших объектов, различимых на растровом изображении, характеризуется пространственным разрешением 5,0 нм при 0,2 кВ. Электронный микроскоп увеличивал фрагмент наблюдаемой поверхности в 1000 раз. Глубина яркости пикселей изображения составляла 256 уровней (разрядная сетка 8 бит).

Параметры шероховатости, регламентируемые ГОСТ, исследуемых поверхностей измеря-



b

Рис. 1. Изображение шероховатой полированной поверхности пера лопатки ГТД (a) и преобразованное изображение (b) с вертикальными и горизонтальными прямоугольниками

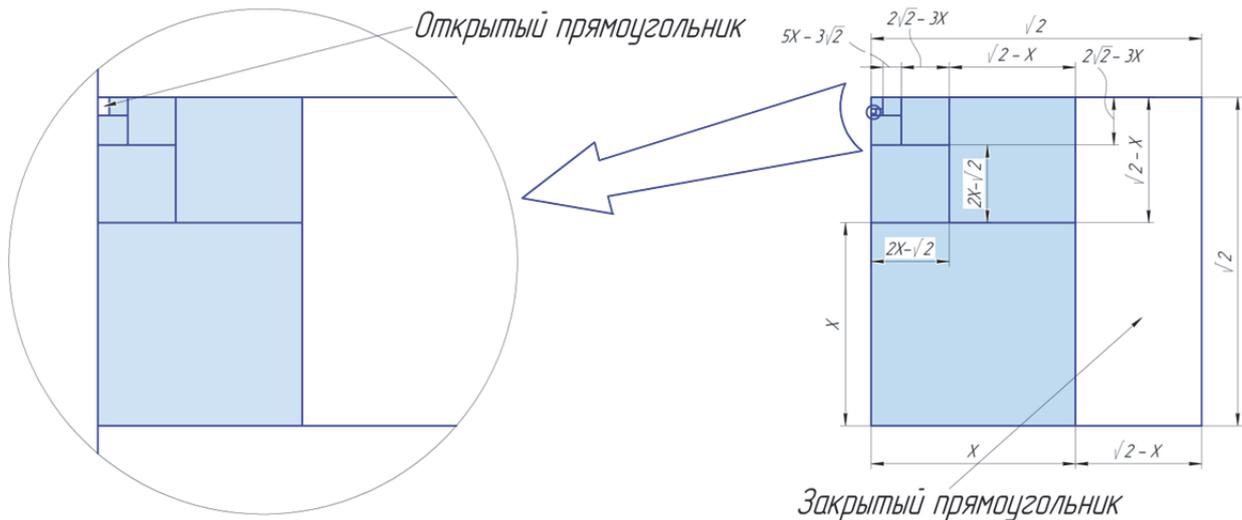


Рис. 2. Размещение ортогонально и без пересечений конечной последовательности квадратов s_i общей площадью 1 в квадрате S площадью 2.

Величина элементов последовательности $\{f_i, i = \overline{1, n}\}$ есть нормированные числа Фибоначчи

лись с помощью профилографа-профилометра модели 252 завода «Калибр».

Длина разрядной сетки (n) для записи глубины цвета определяет точность фиксирования на изображении шероховатой поверхности высоты микронеровностей с точностью до одной градации серого цвета (шумы квантования). В Таблице 1 приведены значения относительной погрешности δ высоты микронеровностей для различной разрядной сетки при условии, что максимальная высота микронеровностей принята равной 1.

В работе считалось, что фрагмент исследуемой поверхности пера лопатки ГТД является плоским и перпендикулярен оптической оси объектива микроскопа.

Отметим, что на изображении шероховатой поверхности может присутствовать не весь интервал изменения яркости каждого пикселя, определяемый 8-ми разрядной сеткой.

Причиной этого может быть определённая освещённостью шероховатой поверхности при формировании её растрового изображения, а также реальная малая высота микронеровностей.

В работах [20, 23-24] рассматривается последовательность $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$, в которой отсутствуют элементы, равные между собой. Для изображения шероховатой поверхности могут быть

различные уровни микронеровностей (или, что одно и то же, различные ГСЦ), которые состоят из одинакового количества пикселей. Другими словами, возможны совпадения $s_i = s_j$. Для преобразования изображения – это обстоятельство не является ограничительным.

В Таблице 2 приведены значения площадей закрытого и открытого прямоугольника для различных глубин яркости пикселей изображения.

Размерность изображения на рис. 1 а составляла 515x520 пикселей. При обработке массива оцифрованного изображения было обнаружено, что 0,013 % пикселей имело значения яркости, выходящее за границы рассматриваемого интервала (0-255) ГСЦ для используемой разрядной сетки. Причиной этого явления могут быть шумы считывания, дробовой и темновой шумы. Очевидно, что указанные шумы суммируются с шумами квантования (δ), приведенными в Таблице 1.

Аналогичные результаты были получены для фрагментов поверхности пера лопатки, сформированных другими финишными операциями (рис. 3). Размеры изображений на рис. 3 также имели размеры 512x520 пикселей.

На растровом изображении «абсолютно» гладкой поверхности будет присутствовать один из 256 уровней глубины яркости. По этой причине последовательность $\{s_i\}$ будет состоять из од-

Таблица 1. Погрешность глубины изображения микронеровностей, определяемая разрядной сеткой

	Длина используемой разрядной сетки (n), бит		
	8	12	16
Количество градаций серого, n	256	4096	65636
Погрешность $\delta = \frac{1}{n} 100, \%$	100%/256 = 0,03 %	100%/4096 = 0,0024 %	100%/65636 = 0,00015 %

Таблица 2. Площадь открытых и закрытых прямоугольников для упаковки последовательности квадратов $\{f_i, i = \overline{1, n}\}$

	Длина используемой разрядной сетки (n), бит		
	8	12	16
Количество градаций серого, n	256	4096	65636
Площадь ¹ закрытого прямоугольника	$(\sqrt{2} - 0.8740320) \times \sqrt{2} = 0.7639319$	$(\sqrt{2} - 0.8740320) \times \sqrt{2} = 0.7639319$	$(\sqrt{2} - 0.8740320) \times \sqrt{2} = 0.7639319$
Площадь открытого прямоугольника	0	0	0

¹ Площадь закрытого прямоугольника для разных глубин яркости пикселей изображения различна, но разница находится за границами длины 8-разрядной сетки

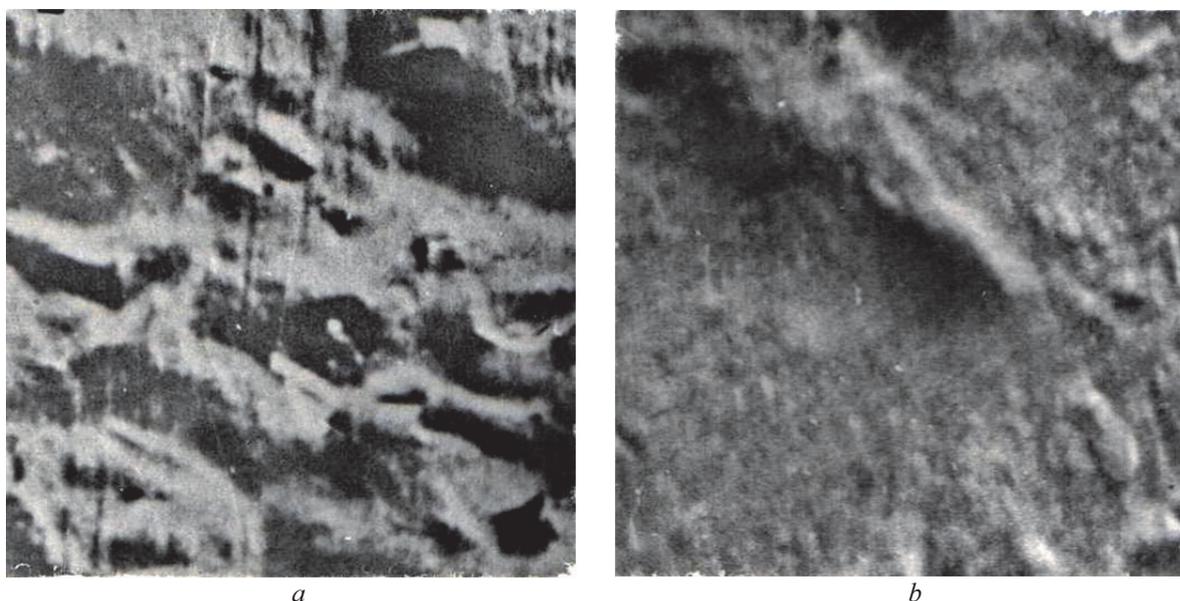


Рис. 3. Изображения фрагментов поверхности пера лопатки ГТД после различных финишных операций:
 а – обработка микрошариками; б – обработка виброупрочнением

ного элемента $s_j = j$. Величина j определяется отражающей способностью исследуемой поверхности. Для «абсолютно» шероховатой поверхности на растровом изображении должны присутствовать все градации серого цвета. Положим, что «абсолютно» шероховатой поверхности будет соответствовать наиболее плотная упаковка квадратов $\{s_i\}$. В терминах второго алгоритма упаковки работы [20] это будет означать наличие одного закрытого прямоугольника (рис. 2).

Дополнительно преобразованное изображение шероховатой поверхности может быть охарактеризовано принадлежностью его к определенному классу. Используя терминологию [24], упаковка гистограммы изображения считается «простой», если выполняется неравенство:

$$s_i \leq f_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

Выполнение последнего неравенства означает, что при упаковке квадратов $\{s_i, i = \overline{1, n}\}$

не используются закрытые прямоугольники. Если неравенство не выполняется, такая упаковка называется «составной».

Следует отметить, что остается открытым вопрос о том, какие топологические особенности имеет шероховатая поверхность в случае её соответствия «простой» или «составной» упаковке.

В параметризации использовались изображения поверхности на рис. 1 а и на рис. 3 а, б. Для параметризации использовалось также синтезированные гистограммы с равномерным и нормированным распределением своих значений и со значениями нормированной последовательности $\{f_i, i = \overline{1, 256}\}$.

Гистограммы с равномерным и нормированным распределением своих значений формировалось следующим образом. Сумма значений гистограммы соответствовало $512 \times 520 = 266240$, что соответствовало количеству пикселей на

изображении рис. 1 а. Количество пикселей, проходящих на каждый из 256 уровней изображения шероховатости, составляло: $269360:256 = 1040$ пикселя. Это означает, что каждая яркость пикселя от 0 до 255 встречается на изображении с частотой $1040/266240 = 0,0039$. В этом случае каждый квадрат s_i , размещаемый в квадрате S , имеет сторону $\sqrt{0,0039} = 0,062$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Параметризация изображений происходила в последовательности применения различных технологических операций при финишной обработке отверстий, то есть рис. 3 а, рис. 3 б и рис. 1 а. Затем выполнялась параметризация гистограммы с равномерным распределением своих значений и со значениями нормированной последовательности $\{f_i, i = \overline{1,256}\}$.

В Таблице 3 приведены следующие параметры: экономичность заполнения (w), экономичность покрытия (W), количество открытых и закрытых прямоугольников при формировании преобразованного изображения, а также формирование вертикальных и горизонтальных прямоугольников при упаковке (рис. 1 б), и принадлежность преобразованного изображения открытой упаковке или составной. Также в Таблице 3 присутствуют параметры шероховатости, регламентированные действующим ГОСТ.

Анализ данных Таблицы 3 показал, что такие показатели, как простая или составная упаковка применительно к анализируемым изображе-

ниям поверхности не информативны. Вместе с этим для поверхностей, имеющих гистограммы с заданными особенностями, например, равномерный характер значений или, когда значения гистограммы есть элементы последовательности Фибоначчи, эти показатели различны. По моему мнению эти показатели могут использоваться для характеристики различных классов шероховатой поверхности. Аналогичным образом можно использовать количество открытых и закрытых прямоугольников при реализации упаковки изображения поверхности. Вопрос, как эти классы шероховатых поверхностей соотносятся с реальными поверхностями, остается открытым.

Используемый алгоритм реализации упаковки формирует на преобразованном изображении шероховатой поверхности прямоугольники, у которых большая сторона может быть горизонтальной или вертикальной (рис. 1 б). Проведенные исследования показали: количество прямоугольников с различной ориентацией относительно друг друга может характеризовать шероховатость по её изображению. При этом следует отметить, что не обнаружена линейная зависимость (пропорциональность) между регламентируемыми параметрами шероховатости и прямоугольниками на упаковке гистограммы.

Экономичность заполнения (w) и экономичность покрытия (W) для рассматриваемых изображений максимально изменяются соответственно на 25,4% и 76,3%. При этом направ-

Таблица 3. Параметры шероховатой поверхности, определенные по изображению поверхности и профилем методом

Параметры	Виды технологического воздействия на поверхность				
	Реальные поверхности			Синтезированные нормированная гистограммы	
	Полирование	Микрошарики	Виброупрочнение	Равномерная	$\{f_i, i = \overline{1, n}\}$
Экономичность заполнения (w)	1,653	2,0734	1,70481	128	1
Экономичность покрытия (W)	0,013472	0,007643	0,007921	1,057851	1
Количество прямоугольников открытых/закрытых	1/255	1/255	1/255	0/1*	0/1
Количество прямоугольников вертикал./горизонт.	115/110	134/122	129/126	1/2	1/0
Упаковка простая/составная	составная	составная	составная	составная	простая
Ra/Rz, мкм	0,38/0,028	0,12/2,5	0,193/1,610	-	-

* возможно при отсутствии отражающей способности у исследуемой поверхности

ление (тренд) изменений параметров w и W совпадает с направлением изменения параметров шероховатости, измеренных профильным методом.

Вопрос о том, сохраняется ли такое соотношение параметров w , W и Ra , Rz для других изображений шероховатой поверхности, требует дополнительных исследований.

Я считаю, что параметры w , W могут рассматриваться как аналог регламентируемого параметра шероховатости - относительная опорная длина профиля tp . Отметим в связи с этим, что в соответствии с ГОСТ 2789-73 при определении tp с помощью профилограммы допускается погрешность относительной опорной длины профиля $\gg \pm 5\%$. Параметры w и W , которые можно рассматривать, как аналог tp , определяются для 8-ми разрядной сетки с погрешностью не более 0,03 % (см. Таблица 1). К этой погрешности следует добавить искажения изображения, вносимые шумами считывания, дробовыми и темновыми шумами. В совокупности эти шумы для современных технических средств являются причиной погрешности, максимальная величина которых не более 0,05 %. Из чего следует, что предлагаемый метод позволяет более точно параметризовать шероховатую поверхность, в сравнении с традиционным профильным методом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика параметризации шероховатой поверхности по её изображению может быть востребована при контроле за поверхностью деталей, изготавливаемых серийно. Методика не требует дорогостоящего оборудования. Для использования методики нет необходимости в обучении персонала. Параметризация шероховатости с помощью изображения позволяет более точно и достоверно характеризовать микронеровности в отличие от профильного метода. Параметры экономичности заполнения (w) и экономичности покрытия (W) могут рассматриваться, как аналог параметра относительной опорной длины профиля tp . При этом погрешность измерения параметров w и W меньше, чем регламентируемая погрешность определения tp .

Вместе с этим следует отметить, что недостаточно изучены следующие вопросы:

- влияние на параметры преобразованного изображения цифровых шумов изображения шероховатой поверхности;

- влияние размеров изображения шероховатой поверхности на параметры упаковки.

Я продолжу исследования в этом направлении, о полученных результатах сообщу в своих следующих публикациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абульханов, С.Р. Повышение конструкционной прочности деталей авиадвигателей алмазным выглаживанием отверстий / С.Р. Абульханов, К.Ф. Митряев // Совершенствование технологических процессов изготовления и сборки авиадвигателей: сборник научных трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1988. – С.128-136.
2. Абульханов, С.Р. Определение оптимального режима алмазного выглаживания бурильных труб из алюминиевого сплава для глубоководного бурения / С.Р. Абульханов, Л. Д. Мазурова, Б.В. Емец // Исследования в области разработки и эксплуатации нефтепромысловых труб: сборник научных трудов. Куйбышев: ВНИИ разработки и эксплуатации нефтепромысловых труб. Гипровостокнефть. – 1989. – С. 102-106.
3. Абульханов, С.Р. Исследования остаточных напряжений при алмазном выглаживании отверстий в деталях из стали 12Х18Н9Т / С.Р. Абульханов // Методы повышения эффективности использования режущих инструментов при обработке деталей летательных аппаратов и двигателей: сборник научных трудов. – Куйбышев: КуАИ, 1986. – С.112-116.
4. Абульханов, С.Р. Исследование шероховатости поверхности отверстий малого диаметра в деталях из стали 12Х18Н9Т при обработке алмазным выглаживанием / С.Р. Абульханов // Высокоэффективные методы и инструменты для механической обработки авиационных материалов: межвузовский сборник. – Куйбышев: КуАИ. – 1984. – С.83-88.
5. Абульханов, С.Р. Линейная математическая модель для определения рациональных условий обработки на операциях алмазного выглаживания при изготовлении деталей авиационной техники / С.Р. Абульханов, Д.Л. Скуратов, А.Н. Швецов // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2012. – № 3(34). – Ч.4. – С.115-121.
6. Табенкин, А.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт. Научное издание / А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов [под ред. канд. техн. наук Н.А. Табачниковой]. – СПб.: Изд-во Политехн, ун-та, 2007. – 136 с.
7. Мельников, В.Г. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения / В. Г. Мельников, Л. С. Казанов. – М.: Высш. школа, 1978. – 253 с.
8. Сазонов, М.Б. Повышение долговечности и надёжности лопаток компрессора ГТД путём регулирования состояния поверхностного слоя комбинированной упрочняюще-отделочной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: Специальность 05.07.05 – Тепловые двигатели летательных аппаратов / М.Б. Сазонов. - Куйбышев, 1990. – 282 с.
9. Бородин, С.А. Устройство для анализа нанощероховатостей и загрязнений подложки по динамическому состоянию капли жидкости, наносимой на ее поверхность / С.А. Бородин, А.В. Волков, Н.Л. Казанский // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 42-47.
10. Казанский, Н.Л. Формирование оптического микрорельефа во внеэлектродной плазме высоковольтного газового разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь. – 2009. – 220 с. ISBN: 5-89776-011-X.

11. *Kazanskiy N.L., Popov S.B.* Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2010. – Vol. 19, No. 1. – P. 23–30.
12. *Ignat'ev P.S., Kol'ner L.S., Indukaev K.V. et al.* Laser Modulation Interference Microscopy as a Means of Controlling the Form and Roughness of Optical Surfaces // *Measurement Techniques*. – 2015. – Vol. 58. – P. 772–776.
13. *Kazanskiy N.L., Kolpakov V.A.* Optical Materials: Microstructuring Surfaces with Off-Electrode Plasma. – CRC Press. – London. – 2017. – Series: Engineering & Technology, Physical Sciences. – 212 p.
14. *Viktorenkov A.E., Yakimov P.U.* Surface roughness estimation by using a 3D model reconstructed from multiple images // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1368(5). – P. 052037.
15. *Kazanskiy N.L., Skidanov R.V.* Technological line for creation and research of diffractive optical elements // *Proc. SPIE*. – 2019. – Vol. 11146 “Optical Technologies for Telecommunications 2018”. – P. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
16. *Kazanskiy N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N.* Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index // *Computer Optics*. – 2020. – Vol. 44(3). – P. 295–318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.
17. *Kazanskiy N.L., Khonina S.N., Butt M.A., Kazmierczak A., Piramidowicz R.* State-of-The-Art Optical Devices for Biomedical Sensing Applications—A Review // *Electronics*. – 2021. – Vol. 10(8). – P. 973. <https://doi.org/10.3390/electronics10080973>.
18. *Lee S., et al.* Fatigue behavior and modeling of additively manufactured IN718: The effect of surface treatments and surface measurement techniques / S. Lee, S. Shao, D.N. Wells, M. Zetek, M. Kepka, N. Shamsaei // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2022. – Vol. 302. – ID 117475. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117475.
19. *Abul'khanov S.R., Kazanskiy N.L.* Information Pattern in Imaging of a Rough Surface / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskiy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 302. – P. 012068. – DOI: 10.1088/1757-899x/302/1/012068.
20. *Васильев, Н.* Упаковка квадратов / Н. Васильев, Г. Гальперин // *Квант*. – 1973. – № 4. – С. 35–37 (решение задачи М155 из «Задачника «Кванта»)
21. *Abul'khanov S.R., et al.* Highly sensitive method for remote analysis of diagnostic images / S.R. Abul'khanov, I.M. Bairikov, O.V. Slesarev, Yu.S. Strelkov // *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. – 2019. – Vol. 11516. – P. 115161B. – DOI: 10.1117/12.2566096.
22. *Абульханов, С.Р.* Технология высокочувствительного анализа медицинских диагностических изображений / Абульханов С.Р., О.В. Слесарев, Ю.С. Стрелков, И.М. Байриков // *Современные технологии в медицине*. – 2021. – Т. 13, № 2. – С. 6–17. – DOI: 10.17691/stm2021.13.2.01.
23. *Кордемский, Б.А.* Удивительный квадрат / Б.А. Кордемский. – М.: Гостехиздат, 1952. – 160 с.
24. *Яглом, И.М.* Как разрезать квадрат? / И.М. Яглом. – М.: Наука, 1968. – 112 с.
25. *Тот Л. Ф.* Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве: научное издание / Л. Ф. Тот; пер. с нем. – М.: Физматгиз. – 1958. – 363 с.
26. *Рассел, Д.* Числа Фибоначчи / Д. Рассел. М.: PubMix, 2014. – 108 с.

PARAMETERIZATION OF THE ROUGH SURFACE IMAGE OF MECHANICAL PARTS

© 2022 S.R. Abul'khanov

Samara National Research University, Samara, Russia

Using the transformation of a raster image of a rough surface, combinatorial parameters are introduced, which are determined on the basis of the histogram of the controlled surface fragment. The proposed parameters characterize the area of each level of microroughness. The dynamics of changes in a rough surface as a result of technological impact on it is estimated using the efficiency of filling and the economy of coating. For parameterization of the controlled fragment of the surface, the features of the raster image transformation algorithm were also used. For the image of the GTE blade feather at different stages of its finishing, the introduced parameters for the image of a rough surface were determined. The limits of applicability of the proposed parameters for controlling the dynamics of changes in a rough surface are shown. The ways of developing the proposed parameters for rough surfaces operating under various conditions are indicated.

Keywords: rough surface, bitmap image, cost-effectiveness of filling and cost-effectiveness of coating, open and closed rectangles of the transformed image:

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-1-114-122

REFERENCES

1. *Abul'hanov, S.R.* Povyshenie konstrukcionnoj prochnosti detalej aviadvigatelej almaznym vyglazhivaniem otverstij / S.R. Abul'hanov, K.F. Mitryaev // *Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh processov izgotovleniya i sborki aviadvigatelej: sbornik nauchnyh trudov*. – Kujbyshev: KuAI, 1988. – S.128–136.
2. *Abul'hanov, S.R.* Opredelenie optimal'nogo rezhima almaznogo vyglazhivaniya buril'nyh trub iz alyuminievogo splava dlya glubokovodnogo bureniya / C.R. Abul'hanov, L. D. Mazurova, B.V. Emec // *Issledovaniya v oblasti razrabotki i ekspluatcii*

- neftpromyslovyh trub: sbornik nauchnyh trudov. Kujbyshev: VNII razrabotki i ekspluatatsii neftpromyslovyh trub. Giprovostokneft'. – 1989. – S. 102-106.
3. *Abul'hanov, S.R.* Issledovaniya ostatochnykh napryazhenij prialmaznom vyglazhivanii otverstij v detalyah iz stali 12H18N9T / S.R. Abul'hanov // Metody povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya rezhushchih instrumentov pri obrabotke detalej letatel'nyh apparatov i dvigatelej: sbornik nauchnyh trudov. - Kujbyshev: KuAI, 1986. - S.112-116.
 4. *Abul'hanov, S.R.* Issledovanie sherohovatosti poverhnosti otverstij malogo diametra v detalyah iz stali 12H18N9T pri obrabotkealmaznym vyglazhivaniem / S.R. Abul'hanov // Vysokoeffektivnye metody i instrumenty dlya mekhanicheskoy obrabotki aviacionnyh materialov: mezhvuzovskij sbornik. - Kujbyshev: KuAI. – 1984. - S.83-88.
 5. *Abul'hanov, S.R.* Linejnaya matematicheskaya model' dlya opredeleniya racional'nyh uslovij obrabotki na operaciyahalmaznogo vyglazhivaniya pri izgotovlenii detalej aviacionnoj tekhniki / C.R. Abul'hanov, D.L. Skuratov, A.N. SHvecov // Vestnik Samar. gos. aerokosm. un-ta. – 2012. – ¹ 3(34). – CH.4. – S.115-121.
 6. *Tabenkin, A.N.* SSherohovatost', volnistost', profil'. Mezhdunarodnyj opyt. Nauchnoe izdanie /, A.N. Tabenkin, S.B. Tarasov, S.N. Stepanov [pod red. kand. tekhn. nauk N.A. Tabachnikovoj]. – SPb.: Izd-vo Politekhn, un-ta, 2007. – 136 s.
 7. *Mel'nikov, V.G.* Osnovy standartizatsii, dopuski, posadki i tekhnicheskie izmereniya / V. G. Mel'nikov, L. S. Kazanov. – M.: Vyssh. shkola, 1978. – 253 s.
 8. *Sazonov, M.B.* Povyshenie dolgovechnosti i nadyozhnosti lopatok kompressora GTD putyom regulirovaniya sostoyaniya poverhnostnogo sloya kombinirovannoj uprochnyayushche-otdelochnoj obrabotkoj: dis. ... kand. tekhn. nauk: Special'nost' 05.07.05 – Teplovye dvigateli letatel'nyh apparatov / M.B. Sazonov. - Kujbyshev, 1990. – 282 s.
 9. *Borodin, S.A.* Ustrojstvo dlya analiza nanosherohovatej i zagryaznenij podlozhki po dinamicheskomu sostoyaniyu kapli zhidkosti, nanosimoy na ee poverhnost' / S.A. Borodin, A.V. Volkov, N.L. Kazanskij // Opticheskij zhurnal. – 2009. – T. 76, № 7. – S. 42-47.
 10. *Kazanskij, N.L.* Formirovanie opticheskogo mikrorel'efa vo vneelektrodnoj plazme vysokovol'tnogo gazovogo razryada / N.L. Kazanskij, V.A. Kolpakov. – M.: Radio i svyaz'. – 2009. – 220 s. ISBN: 5-89776-011-X.
 11. *Kazanskij N.L., Popov S.B.* Machine Vision System for Singularity Detection in Monitoring the Long Process // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2010. – Vol. 19, No. 1. – P. 23-30.
 12. *Ignat'ev P.S., Kol'ner L.S., Indukaev K.V. et al.* Laser Modulation Interference Microscopy as a Means of Controlling the Form and Roughness of Optical Surfaces // Measurement Techniques. – 2015. – Vol. 58. – P. 772-776.
 13. *Kazanskij N.L., Kolpakov V.A.* Optical Materials: Microstructuring Surfaces with Off-Electrode Plasma. – CRC Press. – London. – 2017. – Series: Engineering & Technology, Physical Sciences. – 212 p.
 14. *Viktorenkov A.E., Yakimov P.U.* Surface roughness estimation by using a 3D model reconstructed from multiple images // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1368(5). – P. 052037.
 15. *Kazanskij N.L., Skidanov R.V.* Technological line for creation and research of diffractive optical elements // Proc. SPIE. – 2019. – Vol. 11146 “Optical Technologies for Telecommunications 2018”. – P. 111460W. DOI: 10.1117/12.2527274.
 16. *Kazanskij N.L., Butt M.A., Degtyarev S.A., Khonina S.N.* Achievements in the development of plasmonic waveguide sensors for measuring the refractive index // Computer Optics. – 2020. – Vol. 44(3). – P. 295-318. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-743.
 17. *Kazanskij N.L., Khonina S.N., Butt M.A., Kazmierczak A., Piramidowicz R.* State-of-The-Art Optical Devices for Biomedical Sensing Applications—A Review // Electronics. – 2021. – Vol. 10(8). – P. 973. <https://doi.org/10.3390/electronics10080973>.
 18. *Lee S., et al.* Fatigue behavior and modeling of additively manufactured IN718: The effect of surface treatments and surface measurement techniques / S. Lee, S. Shao, D.N. Wells, M. Zetek, M. Kepka, N. Shamsaei // Journal of Materials Processing Technology. – 2022. – Vol. 302. – ID 117475. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117475.
 19. *Abul'khanov S.R., Kazanskij N.L.* Information Pattern in Imaging of a Rough Surface / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskij // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 302. – P. 012068. – DOI: 10.1088/1757-899x/302/1/012068.
 20. *Vasil'ev, N.* Upakovka kvadratov / N. Vasil'ev, G. Gal'perin // Kvant. – 1973. – ¹ 4. – S. 35-37 (reshenie zadachi M155 iz «Zadachnika «Kvanta»)
 21. *Abul'khanov S.R., et al.* Highly sensitive method for remote analysis of diagnostic images / S.R. Abul'khanov, I.M. Bairikov, O.V. Slesarev, Yu.S. Strelkov // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2019. – Vol. 11516. – P. 115161B. – DOI: 10.1117/12.2566096.
 22. *Abul'hanov, S.R.* Tekhnologiya vysokochuvstvitelnogo analiza medicinskih diagnosticheskikh izobrazhenij / Abul'hanov S.R., O.V. Slesarev, YU.S. Strelkov, I.M. Bajrikov // Sovremennye tekhnologii v medicine. – 2021. – T. 13, ¹ 2. – S. 6-17. – DOI: 10.17691/stm2021.13.2.01.
 23. *Kordemskij, B.A.* Udivitel'nyj kvadrat / B.A. Kordemskij. – M.: Gostekhizdat, 1952. -160 s.
 24. *YAgglom, I.M.* Kak razrezat' kvadrat? / I.M. YAgglom. – M.: Nauka, 1968. – 112 s.
 25. *Tot L.F.* Raspolozheniya na ploskosti, na sfere i v prostranstve: nauchnoe izdanie / L. F. Tot; per. s nem. – M.: Fizmatgiz. – 1958. – 363 s.
 26. *Rassel, D.* CHisla Fibonachchi / D. Rassel. M.: PubMix, 2014. - 108 s.