УДК 620.179.118

**Анализ измерительной информации о шероховатости поверхностей, полученных при электроэрозионной обработке**

**Сергей Николаевич Григорьев1, Дмитрий Александрович Мастеренко2, Эдуард Сергеевич Скопцов3**

1, 2, 3 Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия

1s.grigoriev@stankin.ru, https://orcid.org/0000-0002-8239-5354

2d.masterenko@stankin.ru, https://orcid.org/0000-0003-1041-4218

3

**Аннотация.** Приведены результаты исследования микропрофилей поверхностей, полученных при разрезании стальных заготовок электроэрозионным методом. Подтверждён ранее известный вывод о том, что средняя высота неровностей увеличивается с ростом тока импульса. Установлено, что наряду с этим изменяется и фрактальная размерность профиля в диапазоне масштабов 20..500 мкм. Проведён спектральный анализ микронеровностей, в результате которого показано, что основной вклад в их образование вносят пространственные частоты в диапазоне до 0,05 мкм-1. Полученные результаты будут полезны при планировании режимов электроэрозионной обработки в зависимости от функционального назначения поверхностей.

***Ключевые слова***: шероховатость, параметры шероховатости, спектр, спектральная плотность мощности, электроэрозионная обработка, фрактальная размерность.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2021-0003).

**The analysis of the measurement information on surfaces created**

**with the electrical discharge machining method**

**Sergey N. Grigoriev, Dmitry A. Masterenko, Eduard S. Skoptsov**

1, 2, 3Moscow State University of Technology "STANKIN", Moscow, Russia

1s.grigoriev@stankin.ru, https://orcid.org/0000-0002-8239-5354

2 d.masterenko@stankin.ru, https://orcid.org/0000-0003-1041-4218

3

**Abstract.** In the article the results of researches of microprofiles of steel surfaces after electrical discharge cutting are given. The previously known conclusion that the average height of irregularities increases with increasing pulse energy is confirmed. It is found that, along with this, the fractal dimension of the profile also changes in the range of scales 20..500 μm. A spectral analysis of roughness was carried out. It shows that the main contribution to their formation is made by spatial frequencies in the range up to 0,05 μm-1. The results are applicable in a planning of electrical discharge machining planning with respect to the functional purpose of the surface.

**Keywords:** roughness, roughness parameters, spectrum, spectral power density, electrical discharge machining, fractal dimension.

**Financial support.** This work was supported financially by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No FSFS-2021-0003).

**Введение**

Требования к метрологическому обеспечению современного машиностроительного производства постоянно возрастают [1,2]. Это связано с тем, что реализация потенциальных возможностей технологического оборудования возможно только с использованием измерительной информации, получаемой на всех стадиях производственного процесса [2,3,4] . Причём речь идёт не только о традиционном и наиболее важном требовании к измерениям – точности, но и о повышении их информативности, то есть расширении характеристик изделий, значения которых могут быть получены в ходе измерений. Это относится, в частности, к характеристикам микропрофиля поверхностей.

Шероховатость является одним из основных показателей качества изделий в машиностроении и металлообработке. Неровности поверхностей в малых масштабах, как правило, выглядят как реализации случайных процессов, поэтому полная характеризация их свойств довольно сложна. Традиционно в промышленности используются три высотных и три шаговых параметра шероховатости поверхности согласно ГОСТ 2789-73. На их основе можно достаточно уверенно сравнивать качество поверхностей, полученных в процессах обработки одной природы. Больше параметров рассмотрено в ГОСТ Р ИСО 4287-2014, однако и они не могут полностью охарактеризовать всё разнообразие характера микронеровностей и тех свойств, которые они придают поверхностям.

Значительную роль в том, как поверхность будет «работать» в сопряжении деталей, каковы будут её оптические свойства, играют такие характеристики, как распределение высот профиля и его локальных углов наклонов, среднеквадратичное отклонение, спектральная плотность мощности и другие [5,6,7,8,9,10]. Со спектральной плотностью мощности тесно связана автокорреляционная функция профиля, и их влияние на оптические свойства поверхности могут быть использованы для измерения шероховатости [11,12,13].

Относительно недавно принятый стандарт ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 «Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Ареал. Часть 2. Термины, определения и параметры структуры поверхности» вводит в рассмотрение множество параметров микрогеометрии поверхности, причём не только профильных (одномерных), но, как видно уже из названия, площадных (двумерных). Среди них – фрактальные параметры, основанные на построении функций объёма – масштаба или относительной площади [14].

Фрактальными называют объекты, в каком-то отношении самоподобные, то есть выглядящие одинаково во всех масштабах. Свойство самоподобия приводит к тому, что такому объекту можно приписать дробную размерность: например, для фрактальной кривой получается размерность между 1 и 2. Разумеется, в полной мере самоподобным может быть только математический объект, который может быть разделен на части любое количество раз. Однако реальные объекты могут вести себя как фракталы в некотором диапазоне масштабов.

Фрактальная размерность проявляется в различных свойствах поверхностей, связанных с особенностями их обработки [15,16,17], разрушения [7,18], контактного взаимодействия [7,19], а также связана со спектральной плотностью мощности микропрофиля [6,20]. Известны исследования влияния фрактальной размерности на оптические [21,22,23] и адгезионные [24,25,26] свойства поверхностей. Поэтому фрактальные характеристики существенно дополняют традиционные параметры шероховатости.

В настоящей статье приводятся результаты исследования микропрофилей поверхностей образцов, подвергнутых разрезанию на электроэрозионном станке. Электроэрозионный метод обработки потенциально позволяет получать детали с высоким качеством поверхности, однако исследования влияния отдельных параметров на результат продолжаются и в наши дни [27,28,29,30,31,32]. В частности, установлено, что увеличение максимального тока, при прочих равных условиях, приводит к увеличению значения параметра *Ra*. В соответствии со сказанным выше, это не полностью характеризует качество обработанной поверхности. Меньше внимания уделялось длительности импульса, а также свойствам микропрофилей, измеренным не только в продольном, но и в поперечном направлении.

В ряде работ, посвящённым качеству поверхности при электроэрозионной обработке, например, [28,32], отмечается роль лунок, образуемых при разрядах на обрабатываемой поверхности, в общей картине микронеровностей. При электроэрозионной резке электродом служит тонкая проволока, формирующая лунки, направленные перпендикулярно направлению обработки, вследствие можно было бы ожидать некоторых различий микропрофилей, измеренных в различных направлениях.

Задачами нашей работы было исследовать характеристики поверхностей, полученных в результате электроэрозионной обработки, помимо традиционных параметров шероховатости, и сравнить свойства микропрофилей, измеренных в продольном и поперечном направлениях.

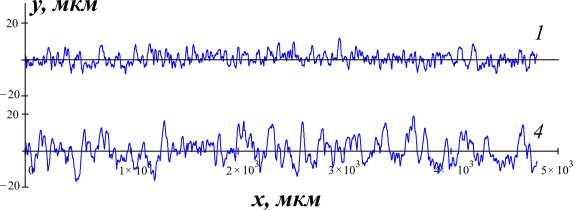
**Описание эксперимента.** Образец из жаропрочного сплава ХН77ТЮР обрабатывался на электроэрозионном станке модели «CUT 30Р» фирмы Agie Charmilles на различных режимах обработки путём прохождения электрода вглубь заготовки по прямолинейной траектории длиной 10 мм на каждом режиме обработки.

Управляющая программа станка при отключении адаптивной системы управления позволяет задать некоторые параметры процесса обработки, прежде всего максимальную силу тока *I*, длительность импульса *Ton* и напряжение (в ходе эксперимента не изменялось). Первые два параметра варьировались на четырёх уровнях. Частота импульсов для всех режимов была на уровне 10 кГц. Однако значения, достигаемые при обработке, не всегда совпадают с заданными, поэтому в ходе обработки производились измерения силы тока *I*, а также, на основе дополнительных измерений напряжения и вибраций, длительности импульса *Ton* и паузы между импульсами *Toff*. Информация о режимах обработки и их параметрах приведена в таблице 1. В дальнейшем в таблицах и на рисунках номера режимов даны согласно данной таблице.

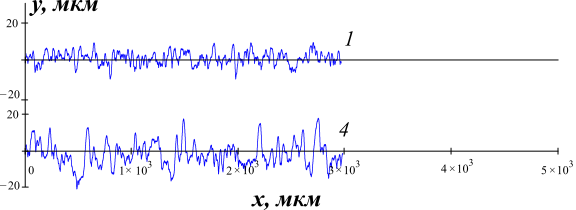
Таблица 1 - Режимы обработки на электроэрозионном станке

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  режима | Уровни параметры режимов обработки | | Измеренные значения параметров режимов обработки | | |
| Номер уровня тoка | Номер уровня длительности импульса *Ton* | Максимальный тoк, A | *Ton*, мкс | *Toff*,  мкс |
| 1 | 1 | 1 | 20 | 5,5 | 202 |
| 2 | 2 | 1 | 40 | 6 | 202 |
| 3 | 3 | 1 | 50 | 6,5 | 201,5 |
| 4 | 4 | 1 | 60 | 6 | 202 |
| 5 | 1 | 2 | 20 | 8 | 201,5 |
| 6 | 2 | 2 | 40 | 8 | 201,5 |
| 7 | 3 | 2 | 60 | 7,5 | 202 |
| 8 | 4 | 2 | 60 | 8 | 201,5 |
| 9 | 1 | 3 | 20 | 20,5 | 201,5 |
| 10 | 2 | 3 | 40 | 20,5 | 201,5 |
| 11 | 3 | 3 | 60 | 20,5 | 201,5 |
| 12 | 4 | 3 | 60 | 20,5 | 201,5 |
| 13 | 1 | 4 | 35 | 401 | 206,5 |
| 14 | 2 | 4 | 40 | 162,5 | 206,5 |
| 15 | 3 | 4 | 60 | 162,5 | 206,5 |
| 16 | 4 | 4 | 60 | 136 | 206,5 |

Обработанные поверхности измерялись на профилографе-профилометре Hommel Tester T8000 (производитель – Hommelwerke Gmbh, Германия), предназначенном для измерения шероховатости поверхностей, с радиусом измерительного наконечника 3 мкм. Измерения были проведены в направлении перемещения проволочки при обработке (далее это направление именуется продольным) на базовой длине 4,8 мм, а также в перпендикулярном направлении (далее называется поперечным) на базовой длине 3 мм. Примеры полученных профилей приведены на рисунке 1.



а)



б)

Рис. 1. Примеры продольных (а) и поперечных (б) профилей шероховатости поверхности, соответствующих режимам обработки, номера которых даны согласно таблице 1

Программным обеспечением профилографа-профилометра были вычислены для каждого профиля высотные параметры шероховатости *Ra*, *Rz*, *Rmax*. Результаты вычислений, представленные в таблице 2, в целом подтверждают вывод, сделанный в работах [32,30,29], что при увеличении тока импульса увеличивается средняя высота неровностей. Можно также заметить, что некоторое влияние на параметр *Ra* оказывает также длительность импульса, но значительно меньшее, чем максимальный ток.

Исследуем, какие ещё особенности обработанной поверхности возникают при изменении режимов электроэрозионной обработки.

Таблица 2 - Параметры шероховатости поверхности при различных режимах обработки

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № режима обработки | Направление измерение параметров шероховатости поверхности | | | | | |
| Продольное | | | Поперечное | | |
| *Ra* | *Rz* | *Rmax* | *Ra* | *Rz* | *Rmax* |
| 1 | 2,464 | 14,747 | 17,127 | 2,151 | 12,704 | 15,737 |
| 2 | 3,052 | 19,258 | 21,350 | 2,935 | 15,268 | 18,012 |
| 3 | 3,372 | 20,745 | 23,375 | 3,452 | 18,973 | 23,223 |
| 4 | 5,046 | 28,125 | 30,890 | 4,233 | 28,889 | 29,730 |
| 5 | 2,438 | 14,583 | 16,007 | 2,15 | 15,724 | 27,830 |
| 6 | 2,636 | 15,980 | 18,181 | 2,688 | 14,735 | 18,241 |
| 7 | 3,422 | 20,603 | 22,985 | 3,187 | 17,127 | 22,138 |
| 8 | 4,512 | 25,425 | 30,782 | 4,324 | 27,458 | 29,335 |
| 9 | 1,938 | 11,699 | 13,663 | 2,175 | 13,542 | 15,586 |
| 10 | 2,794 | 17,491 | 19,808 | 2,882 | 15,516 | 18,224 |
| 11 | 3,372 | 20,699 | 22,488 | 3,164 | 17,722 | 23,647 |
| 12 | 4,51 | 24,982 | 30,922 | 3,237 | 17,335 | 18,528 |
| 13 | 2,174 | 13,452 | 14,498 | 2,077 | 12,627 | 14,478 |
| 14 | 2,821 | 16,275 | 17,518 | 2,588 | 14,868 | 17,844 |
| 15 | 3,395 | 20,604 | 22,441 | 3,09 | 17,770 | 21,031 |
| 16 | 3,952 | 21,826 | 36,449 | 3,335 | 18,179 | 26,830 |

**Спектральный анализ микропрофилей.** Спектральный анализсигналов давно известен, а в современных условиях, с распространением программного обеспечения для математических расчётов, стал ещё и легко осуществимым. Однако лёгкость применения спектральных преобразований не избавляет исследователя от задачи правильной интерпретации их результатов, а учитывая некоторую вариативность реализации соответствующих функций в математических пакетах, иногда их пользователи допускают некоторые неточности, что относится, в частности, к уже упомянутым работам [6,31,29]. По этой причине кратко приведём основные моменты, касающиеся применения цифровых функций спектрального анализа к микропрофилям поверхностей.

Спектральная плотность мощности профиля, высоты которого выражены функцией *y*(*x*), представляет собой функцию пространственной частоты *f*:

, (1)

где *l* – длина, на которой рассматривается профиль. Пространственные частоты в (1) должны рассматриваться как положительные, так и отрицательные, но при этом для любых значений *f* выполняется равенство

, (2)

поэтому почти всегда ограничиваются построением функции (1) только для *f ≥ 0*. Однако помнить про наличие отрицательных частот нужно; в частности, чтобы получить среднее квадратическое отклонение неровностей профиля *Rq*, требуется проинтегрировать спектральную плотность мощности в полном диапазоне частот или, учитывая (2), удвоить интеграл по положительным частотам:

. (3)

При измерениях на цифровом приборе профиль представлен дискретным массивом точек

. (4)

В нашем случае точки располагались с одинаковым шагом 0,5 мкм по горизонтали, то есть

,  мкм.

Поскольку данные о профиле дискретны, то вместо интеграла в выражении (1) используют суммирование – дискретное преобразование Фурье, причём, как правило, специально оптимизированным алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ), который реализован в виде встроенных функций в различных математических программных средах. При этом следует соблюдать некоторую осторожность, поскольку функции БПФ могут использовать разную нормировку результата. Мы пользовались функцией, вычисляющей БПФ согласно формуле

, .

В пакете Mathcad это функция *FFT*. Именно при такой нормировке выполняется соотношение, аналогичное (3), а именно

,

то есть вектор с компонентами

, 

имеет смысл спектра мощности, причём при правильной предварительной обработке данных получается , поскольку  представляет собой просто среднее значение высот микропрофиля , которое, если отсчитывать их от средней линии, равно нулю.

Число отсчётов входного сигнала для применения БПФ должно быть степенью числа 2. В нашем случае измеренные профили содержали 9601 точку. Ближайшее меньшее число, являющееся степенью 2 – это 8192, которое и было принято для проведения спектрального анализа (*N* = 8192).

Само по себе БПФ производится над вектором входных данных безотносительно к интервалу дискретизации, поэтому его результат – комплексный вектор длины 1+*N*/2 – не содержит информации о частотах. В нашем случае, поскольку интервал дискретизации равен  0,5 мкм, наибольшая пространственная частота, соответствующая элементу вектора БПФ с номером *N*/2, равна 1 мкм-1. Наименьшая ненулевая частота, соответствующая элементу с номером 1, равна 1/8192 мкм-1. Элементу с номером *k* соответствует пространственная частота

, . (5)

Мы не приводим сами по себе полученные спектры мощности, поскольку они не содержат каких-либо явно выделяющихся деталей. Вместо этого на рис. 2 приведены примеры графиков накопленной мощности в диапазоне частот, то есть величин

, 

в зависимости от частот (5). На графиках хорошо видно, что практически вся мощность накапливается в спектральных компонентах с пространственными частотами до 0,05 мкм-1. Иными словами, в основном микропрофиль образован неровностями с шагом 20 мкм и более. Аналогичная картина наблюдается и для всех прочих микропрофилей.

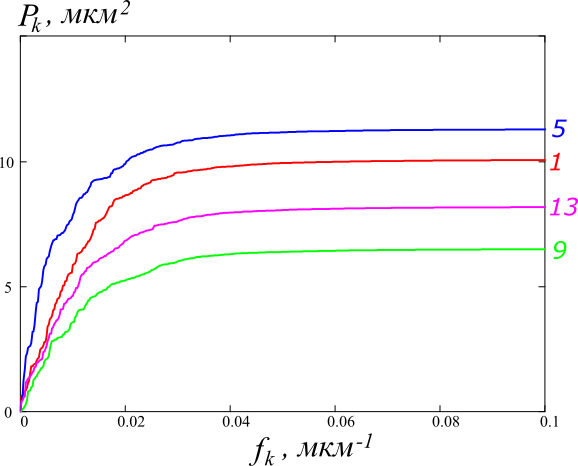


Рис. 2. Накопленная мощность гармонических составляющих микропрофилей до указанной частоты. Номера режимов обработки, соответствующих микропрофилям, даны по табл. 1

Как указано ранее, предельное значение, на которое выходит накопленная мощность, представляет собой квадрат параметра шероховатости *Rq*. Отношение параметров *Rq* и *Ra* для одного и того же микропрофиля зависит от характера распределения высот. Из таблицы 3, в которой приведены отношения упомянутых параметров для измеренных профилей, видно, что все значения примерно одинаковы и не так заметно отличаются от значения 1,253, которое характерно для нормального распределения высот микропрофиля. Всё же имеются различия, которые делают актуальной задачу проведения статистического анализа распределений высот микропрофилей, для изложения результатов которого в данной статье недостаточно места.

Таблица 3 – Отношения параметров шероховатости *Rq* и *Ra*

при различных режимах обработки

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| № режима обработки | Направление измерение параметров шероховатости поверхности | |
| Продольное | Поперечное |
| *Rq/Ra* | *Rq/Ra* |
| 1 | 1.242 | 1.264 |
| 2 | 1.255 | 1.197 |
| 3 | 1.243 | 1.270 |
| 4 | 1.220 | 1.256 |
| 5 | 1.437 | 1.259 |
| 6 | 1.242 | 1.285 |
| 7 | 1.243 | 1.302 |
| 8 | 1.251 | 1.150 |
| 9 | 1.241 | 1.278 |
| 10 | 1.239 | 1.316 |
| 11 | 1.257 | 1.213 |
| 12 | 1.255 | 1.242 |
| 13 | 1.244 | 1.303 |
| 14 | 1.254 | 1.159 |
| 15 | 1.275 | 1.254 |
| 16 | 1.396 | 1.320 |

**Фрактальный анализ микропрофилей**. Для проведения фрактального анализа были использованы функции, реализованные в среде Mathcad, аналогичные описанным в статье [14], но не для двумерной поверхности (ареала), а для одномерного профиля. Таким образом, вместо функции «объём-масштаб» в соответствии с ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 были построены функции, которые можно назвать «площадь-масштаб». Поскольку измерительные данные о микропрофиле, как указано выше, содержали 9601 точку, то были выбраны следующие числа точек, определяющие масштаб рассмотрения профиля: 2, 3, 6, 12, 16, 24, 32, 48, 64, 72, 96, 120, 128, 160, 192, 240, 320, 480, 640, 960. Все эти числа являются делителями числа 9600. Одна точка при этом удалена из рассмотрения, что несущественно для фрактального анализа.

Каждое из указанных чисел представляет собой размер участка *c*, на которые разбивается микропрофиль на данном масштабе рассмотрения. После разбиения строятся верхняя и нижняя огибающие профиля со структурирующим элементом – горизонтальным отрезком, длина которого равна текущему размеру участка. Площадь фигуры, заключённой между верхней и нижней огибающими, принимается за значение функции «площадь-масштаб», для которой введём обозначение *Fas*, при данном значении *c*. График этой функции строится в дважды логарифмическом масштабе, после чего анализируется наклон полученной кривой.

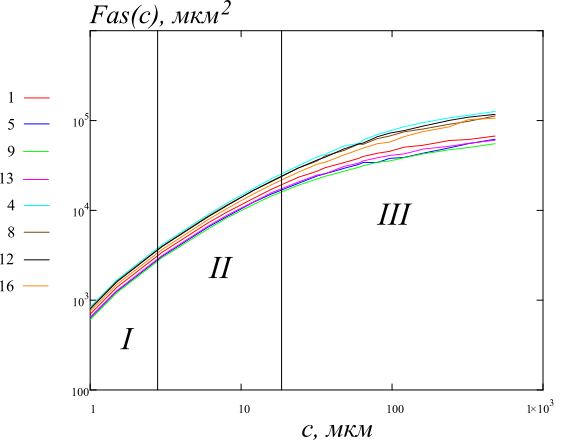


Рис. 3. Графики функций «площадь-масштаб», построенных для продольных микропрофилей поверхностей, полученных при наименьших и наибольших токах

На рис. 3 приведены графики функций «площадь-масштаб». Чтобы не загромождать рисунок, показаны графики только для профилей, полученных в режимах с наименьшими и с наибольшими токами. На рисунке видно, что соответствующие кривые чётко разделяются на две группы, причём, что важно на подобных графиках, не только и не столько по значениям функций, а по наклонам.

Отметим следующие особенности полученных графиков.

1. В области малых масштабов (участок I) обе группы кривых почти сливаются и имеют почти одинаковый наклон, близкий к единичному. Это естественно, поскольку на таких масштабах каждый их участков, на которые разбивается профиль при построении функции «площадь-масштаб», содержит лишь небольшое число точек, не отражающих сложности формы профиля, поэтому свойства самоподобия проявиться не могут. Наблюдаемая картина может служить косвенным признаком корректности вычислений при отладке программных функций.
2. На переходном участке II две группы кривых расходятся, что свидетельствует о различии в структурах соответствующих профилей при увеличении масштаба рассмотрения. На этом участке находится значение величины, названной в ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014 масштабом перехода от гладкой поверхности к шероховатой.
3. На участке III, соответствующем масштабам рассмотрения от 20 мкм, проявляется сложность микропрофилей. Это согласуется и с результатами их спектрального анализа. Наклон кривых между группами различны и оба существенно отличаются от 1. Хотя графики на этом участке не вполне прямолинейны, как должно было быть для фрактальных множеств, но их кривизна заметно меньше, чем на участке II. Средний наклон нижней группы кривых на этом участке составляет 0,349, а верхней – 0,469. Это означает, что в данном диапазоне масштабов профили поверхностей, обработанных большими токами, ведут себя как фракталы с размерностью 1,531, а обработанных меньшими токами – с размерностью 1,651.
4. Различие значений различных функций «площадь-масштаб», видимое на графиках, связано с различными средними высотами неровностей, которое выражается значениями параметра Ra. Эти различия имеются и внутри каждой из двух групп графиков. Важно, однако, что простое масштабирование микропрофиля по вертикали привело бы к изменению значений соответствующей функции «площадь-масштаб», но не привело бы к изменению наклона её графика. Таким образом, полученный результат свидетельствует, что изменение тока при электроэрозионной обработке приводит к изменению не только параметра Ra, но и более сложным изменениям микрогеометрии поверхности.

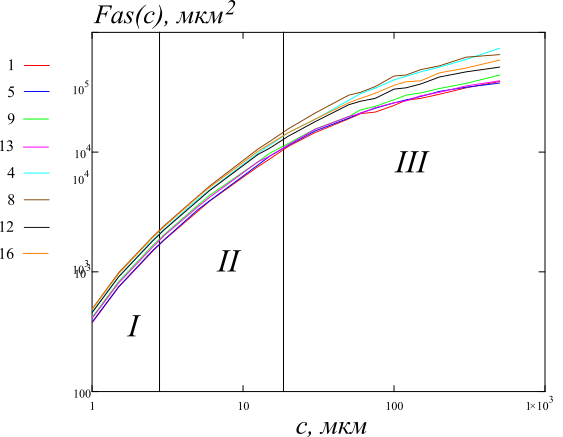


Рис. 4. Графики функций «площадь-масштаб», построенных для поперечных микропрофилей поверхностей, полученных при наименьших и наибольших токах

На рис. 4 приведены графики функций «площадь-объём», построенных для поперечных профилей. Поскольку данные для поперечных профилей включали только 6000 точек, то рассмотрение производилось для разбиений на интервалы, содержащие 2, 3, 5, 6, 10, 12, 25, 30, 40, 60, 100, 120, 150, 200, 240, 300, 400, 600, 1000 точек. Из рисунка видно, что графики разделяются на те же две группы. При этом средний наклон графиков в диапазоне масштабов более 20 мкм для поверхностей, обработанных меньшими токами, составляет 0,369, а для обработанных большими токами – 0,448. Таким образом, фрактальные размерности различаются и для профилей, измеренных в поперечном направлении, что говорит о том, что на характер микронеровностей оказывают влияние не только лунки, отражающие форму электрода, но и другие явления, связанные с воздействием электрического разряда на поверхность.

**Заключение**

В результате проведённых исследований установлено, что увеличение тока при электроэрозионной обработке приводит не только к увеличению средней высоты неровностей обработанной поверхности, но и к изменению её самоподобных свойств, выражаемых фрактальной размерностью. Установлено, что спектральная плотность мощности микронеровностей поверхностей сосредоточена в основном в диапазоне пространственных частот до 0,05 мкм-1. Показано, что длительность импульса в некоторой степени влияет на среднюю высоту неровностей, но практически не влияет на фрактальную размерность поверхности. Полученные результаты могут быть важны для применений обработанной поверхности, например, с точки зрения её оптических и адгезионных свойств, и помогут планировать режимы обработки на электроэрозионном оборудовании.

Список литературы

x

|  |  |
| --- | --- |
| 1. | Grigoriev S.N., Teleshevskii V.I. Measurement problems in technological shaping processes // Measurement Techniques. 2011. Vol. 54. No. 7. pp. 744–749. DOI: https://doi.org/10.1007/s11018-011-9798-5 |
| 2. | Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskii V.I., and Emelyanov P.N. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry // Measurement Techniques. 2013. Vol. 55. No. 11. pp. 1311-1315. |
| 3. | Grigoriev S.N., Martinov G.M. Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool // Procedia CIRP. 2012. Vol. 1. No. 1. pp. 238-243. |
| 4. | Grigoriev S.N., Martinov G.M. An ARM-based Multi-channel CNC Solution for Multi-tasking Turning and Milling Machines // Procedia CIRP. 2016. No. 46. pp. 525-528. |
| 5. | Majumdar A., Bhushan B. Characterization and Modeling of Surface Roughness and Contact Mechanics // In: Handbook of Micro/Nano Tribology. CRC Press, 1999. |
| 6. | Федотов А.А. Спектр мощности как характеристика шероховатости поверхности // Фотоника. 2010. № 6. С. 18-21. |
| 7. | Федотов А.А. Исследование шероховатости поверхностей твёрдых тел применительно к задачам трибологии и механики разрушения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (4). С. 1825–1827. |
| 8. | Yastrebov V.A., Durand J., Proudhon H., and Cailletaud G. Roughsurface contact analysis by means of the Finite Element Method and of a new reduced model // Comptes Rendus M´ecanique. 2011. No. 339(7). pp. 473–490. |
| 9. | Maaboudallah F., Atalla N. An efficient numerical strategy to predict the dynamic instabilities of a rubbing system: application to an automobile disc brake system // Computational Mechanics. 2021. No. 67(4). pp. 1-19. DOI: 10.1007/s00466-021-02003-7 |
| 10. | Najah M., Maaboudallah F., Boucherit M., and Ferguson M. Spectral analysis of the topography parameters for isotropic Gaussian rough surfaces applied to gold coating // Tribology International. 2021. No. 165(2). P. 107339. DOI: 10.1016/j.triboint.2021.107339 |
| 11. | Абрамов А.Д. Определение шероховатости шлифованных поверхностей на основе анализа их автокорреляционных функций // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2008. Т. 10. № 3. |
| 12. | Оразбаев Б.Д., Осовицкий А.Н. Расчётный и экспериментальный анализ характеристик анализатора спектра шероховатости поверхности // Вестник РУДН. Серия Математика. Информатика. Физика. 2011. № 4. С. 135–143. |
| 13. | Ghodrati S., Kandi S.G., and Mohseni M. Nondestructive, fast, and cost-effective image processing method for roughness measurement of randomly rough metallic surfaces // Journal of the Optical Society of America A. 2018. Vol. 6. No. 35. P. 998. DOI: 10.1364/JOSAA.35.000998 |
| 14. | Markov B.N., Masterenko D.A., Emelyanov P.N., and Teleshevskiy V.I. ALGORITHMIZATION FOR CALCULATING FRACTAL PARAMETERS OF THE RELIEF OF A ROUGH SURFACE ACCORDING TO GOST R ISO 25178-2-2014 // Measurement Techniques. 2020. Vol. 63. No. 8. pp. 610-618. |
| 15. | Бавыкин О.Б., Вячеславова О.Ф. Взаимосвязь свойств поверхности и её фрактальной размерности // Известия МГТУ «МАМИ». 2013. Т. 1. № 1 (15). С. 14–18. |
| 16. | Григорьев А.Я. Физика и микрогеометрия технических поверхностей. Минск: Белорусская наука, 2016. 247 с. с. |
| 17. | Алтайский М.В., Иванов В.В., Коренев С.А., Орелович О.Л., Пузынин И.В., and Черник В.В. Образование фрактальных структур на поверхности материалов, облучаемых сильноточными электронными и ионными пучками // Краткие сообщения ОИЯИ. 1997. No. 2 (82). pp. 37–46. |
| 18. | Савенков Г.Г., Барахтин Б.К. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с комплексом стандартных характеристик материала на растяжение // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 6. С. 177–184. |
| 19. | Тихомиров В.П., Измеров М.А. Контактная механика фрактальных поверхностей // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 1 (45). |
| 20. | SHEN J., GONG Y., MENG H., and YANG J. The Fractal Characterization of Mechanical Surface Profile Based on Power Spectral Density and Monte-Carlo Method // E3S Web of Conferences. 2018. Vol. 38. P. 04013. DOI: 10.1051/e3sconf/20183804013 |
| 21. | Денисов С.И., Витренко А.Н. Особенности отражения света от фрактальной поверхности // Вестник СумГУ. 2001. № 3-4. С. 38-42. |
| 22. | Потапов А.А., Лактюнькин А.В. О статистических свойствах поля, рассеянного фрактальной шероховатой поверхностью // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн «ИРЭМВ, 2007». Таганрог. 25–30 июня 2007. |
| 23. | Алиджанов Э.К., Лантух Ю.Д., Раздобреев Д.А. КОНЦЕПЦИЯ ФРАКТАЛА ДЛЯ ОПИСАНИЯ РАССЕЯНИЯ СВЕТА КЛАСТЕРАМИ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ // Труды Всероссийской научно-методической конференции «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ КОМПЛЕКС КАК РЕГИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КУЛЬТУРЫ» 26—27 января 2023 г. Оренбург. 2023. С. 2865—2873. |
| 24. | Ghodrati S., Mohseni M., and Kandi S.G. Dependence of adhesion strength of an acrylic clear coat on fractal dimension of abrasive blasted surfaces using image processing // The 6th International Color & Coating Congress, 10-12 November 2015. Tehran. |
| 25. | Козлов Г.В., Долбин И.В. Фрактальная модель структуры нанонаполнителя, влияющей на степень усиления нанокомпозитов полиуретан/углеродные нанотрубки // Прикладная механика и техническая физика. 2018. Т. 59. № 3. С. 141-144. |
| 26. | Marquardt T., Momber A. Fractal dimensions as a measure for the adhesion of pressure-sensitive adhesives to differently blast-cleaned steel substrates // Conference: 6th International Conference on Adhesive Bonding (AB 2021), July 2021. Porto, Portugal. 2021. |
| 27. | Валетов В.А., Медунецкий В.В. Обепечение качества поверхностей деталей на электроэрозионном оборудовании // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 2 (78). |
| 28. | Абляз Т.Р. Анализ качества обработанной поверхности детали после электроэрозионной обработки // Современные проблемы науки и образования. 2014. URL: https:/​/​science-education.ru/​ru/​article/​view?id=12593 (дата обращения: 2023.06.28). |
| 29. | Башевская О.С., Никитин А.А., Бушуев С.В. Метрологическое исследование микропрофиля и параметров шероховатости прецизионных деталей после электроэрозионной обработки // Вестник МГТУ "СТАНКИН". 2015. № 1 (32). С. 58-64. |
| 30. | Башевская О.С., Бушуев С.В., Никитин А.А., Ромаш Е.В., Подураев Ю.В. Выбор параметров шероховатости для оценки качества поверхности изделий после электроэрозионной обработки // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 20-22. |
| 31. | Башевская О.С., Бушуев С.В., Никитин А.А., Ромаш Е.В., Подураев Ю.В. Оценка шероховатости поверхности по параметрам кривизны выступов и впадин профиля // Измерительная техника. 2017. № 2. С. 20-23. |
| 32. | Иванов П.А., Раменская Е.В., Шапорев В.Д., Янковская Н.Ф., Жабинская А.Н. Влияние режимов электроэрозионной обработки на качество поверхностного слоя // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2020. Т. 1. С. 10 - 12. |

x