

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра Нанотехнологии, материаловедение и механика
(наименование)

22.03.01 Материаловедение и технологии материалов
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Современные материалы и технологии их производства
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Исследование фрактальных характеристик топографии
поверхности после ультразвуковой упрочняющей обработки

Студент

П.В. Князев

(И.О. Фамилия)

Руководитель

к.т.н., доцент А.С. Селиванов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2020

Аннотация

Князев Павел Валерьевич: Исследование фрактальных характеристик топографии поверхности после ультразвуковой упрочняющей обработки

Кафедра «Нанотехнологии, материаловедение и механика», ТГУ, Тольятти, 2020

В работе выполнен аналитический обзор методов качественной и количественной оценки микрогеометрии и топографии поверхностей после различных способов технологической обработки, произведен анализ влияния показателей микрогеометрии поверхностей на ее эксплуатационные характеристики. Проанализированы современные методы оценки поверхностей на основе аппарата фрактальной геометрии. В ходе выполнения работы были спланированы и выполнены экспериментальные исследования по изучению формирования шероховатости поверхности и специфики ее топографии после различных методов обработки, в том числе и комбинированных с применением дополнительной энергии ультразвука. С применением теории фракталов рассчитаны фрактальные характеристики обработанных поверхностей и установлены корреляционные связи фрактальных параметров с параметрами микрогеометрии поверхностей.

Abstract

The paper provides an analytical review of the methods of qualitative and quantitative assessment of microgeometry and surface topography after various processing methods, analyzes the influence of microgeometry of surfaces on its operational characteristics. The modern methods of surface evaluation based on the apparatus of fractal geometry are analyzed. In the course of the work, experimental studies were planned and carried out to study the formation of surface roughness and the specifics of its topography after various processing methods, including those combined using additional ultrasound energy. Using the theory of fractals, the fractal characteristics of the treated surfaces are calculated and correlation relationships of fractal parameters with the parameters of surface microgeometry are established.

Содержание

Аннотация.....	2
Введение.....	5
1 Методы количественной и качественной оценки поверхностей деталей машин после механической обработки.....	7
1.1 Анализ параметров, характеризующих состояние качества поверхности деталей машин.....	7
1.2 Анализ влияния микрогеометрии поверхности на ее эксплуатационные показатели.....	10
1.3 Методы количественной оценки топографии поверхностей с помощью аппарата фрактальной геометрии.....	12
2 Методика экспериментальных исследований.....	16
2.1 Оборудование, инструмент и оснастка.....	16
2.2 Образцы для исследований и режимы обработки.....	18
2.3. Методика измерения шероховатости обработанных образцов.....	20
3 Результаты экспериментальных исследований формирования шероховатости поверхности в процессе механической обработки.....	21
3.1 Результаты исследования предварительной обработки образцов.....	21
3.2 Результаты исследований после различных методов механической обработки	23
4 Результаты расчета фрактальной размерности обработанных образцов.....	28
4.1. Методика расчета фрактальной размерности.....	28
4.1.1 Расчет фрактальной размерности по результатам обработки оптических изображений топографии поверхностей	28
4.1.2 Расчет фрактальной размерности по результатам статистической обработки профиллограм.....	31
4.2. Результаты расчета фрактальной размерности обработанных поверхностей.....	33
Заключение.....	46
Список используемой литературы.....	47

Введение

Состояние поверхности деталей машин и механизмов, формируемой в процессе технологии изготовления является важнейшим параметром, оказывающим влияние на эксплуатационные характеристики изделий машиностроения. При этом, наряду с обеспечением точности изготовления и создания необходимых физико-механических свойств, важно обеспечивать формирование определенной микрогеометрии поверхности.

Традиционно состояние поверхности после обработки характеризуется качественными признаками – видом профилограммы и количественными показателями – среднеарифметическим отклонением профиля, максимальной высотой неровностей, средним шагом неровностей профиля, опорной кривой профиля и т.д. В настоящее время микрогеометрия поверхности рассматривается как статистический объект, сформированный в результате «следа» от траектории перемещения инструмента. Вместе с тем в процессе механической обработки формирование обработанной поверхности происходит не только в результате «копирования» геометрии инструмента, а в процессе сложного и взаимосвязанного воздействия всей совокупности физико-химических процессов, обуславливающих формирование поверхностного слоя, в том числе и обработанной поверхности. В связи с чем формирование микрогеометрии поверхности целесообразно рассматривать как динамическую систему, находящуюся в сложной взаимосвязи формирования всей совокупности свойств поверхностного слоя при обработке.

Таким образом, применение стандартных показателей шероховатости для адекватной количественной оценки микрогеометрии поверхности является недостаточным. Кроме того, обеспечение заданной микрогеометрии поверхностей является актуальным и при освоении

современных технологических методов обработки концентрированными потоками энергии (электрофизическая, электрохимическая, ультразвуковая, лазерная, ионно-лучевая и т.д.), при которых формируется микрорельеф сложной геометрической формы. Применение стандартных показателей для оценки такого микрорельефа представляется малоэффективным, а в некоторых случаях практически невозможным.

В связи с чем, необходимы новые подходы для адекватной количественной оценки микрорельефа обработанных поверхностей. В последнее время в отечественной и зарубежной научной литературе встречаются исследования микрорельефа поверхностей с помощью фрактальной геометрии. Анализ этих работ показывает эффективность применения теории фракталов для адекватной оценки шероховатости поверхности. Однако, исследований в этом направлении недостаточно – не в полной мере освещены вопросы корреляционной связи стандартных показателей шероховатости поверхности с ее фрактальными характеристиками, отсутствуют исследования фрактальных характеристик поверхностей после комбинированной обработки.

1 Методы количественной и качественной оценки поверхностей деталей машин после механической обработки

1.1 Анализ параметров, характеризующих состояние качества поверхности деталей машин

Существенный вклад в разработку научных основ технологического обеспечения показателей шероховатости поверхности и установлении их взаимосвязи с эксплуатационными характеристиками внесли отечественные и зарубежные ученые В. Ф. Безъязычный, А. А. Маталин, Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, И.В. Крагельский и др. [2, 4, 14] В этих работах установлены причинно-следственные связи формирования показателей шероховатости поверхности с режимами механической обработки и с условиями эксплуатации, разработаны модели шероховатых поверхностей, отмечена роль показателей шероховатости поверхности в обеспечении износостойкости деталей машин. Однако, как отмечают сами авторы, для моделирования процессов технологического обеспечения заданных показателей микрогеометрии поверхности и назначения рациональных режимов обработки наличие сведений только о стандартизированных показателях шероховатости в виде Ra , Rz недостаточны, а технологическое обеспечение заданной опорной кривой профиля поверхности вообще не регламентируется. Кроме того, при моделировании шероховатости поверхности используются простые геометрические формы в виде конуса, сферы, цилиндра, не отражающие реальный профиль поверхности.

Поверхность детали формируется в технологическом процессе ее изготовления [2, 5, 15], при этом для оценки топографии поверхностей в настоящее время пользуются такими количественными показателями как макроотклонения, волнистость, шероховатость и субшероховатость [2]. На рис. 1. представлена типовая профиллограмма поверхности с указанием количественных геометрических показателей.

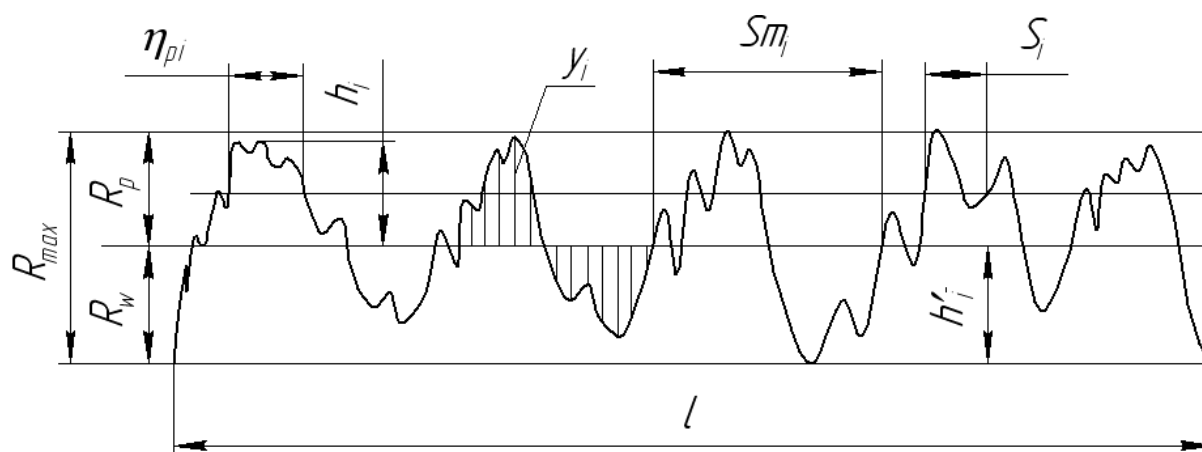


Рисунок 1- Профилограмма поверхности

В соответствии с действующим ГОСТ 2789 – 73 для количественной оценки топографии поверхности применяются такие стандартные параметры как среднеарифметическое отклонение профиля; высота неровностей профиля по десяти точкам; наибольшая высота профиля; средний шаг неровностей профиля; средний шаг местных выступов профиля; относительная опорная длина профиля. Стоит отметить, что в настоящее время технологические методы обработки поверхностей «унифицированы» относительно достижения стандартных показателей микрогеометрии.

Кроме стандартизированных характеристик микрогеометрии применяются и другие показатели, оказывающие влияние на эксплуатационные свойства деталей машин. К ним относятся следующие: средне квадратическое отклонение профиля; высота сглаживания профиля шероховатости; глубина сглаживания профиля шероховатости; коэффициент заполнения профиля; параметры начального участка кривой опорной поверхности [18]. Также регламентированы геометрические параметры выступов топографии поверхности: средний радиус выступов профиля и средний радиус местного выступа профиля шероховатости (рис. 2).

Таблица 1. – Соотношение значений параметров R_a , R_z , R_{max} и базовой длины l по ГОСТ 2789-73.

R_a , мкм	$R_z = R_{max}$, мкм	l , мм
менее 0,025	менее 0,10	0,08
0,025...0,4	0,10...1,6	0,25
0,4...3,2	1,6...12,5	0,8
3,2...12,5	12,5...50	2,5
12,5...100	50...400	8,0

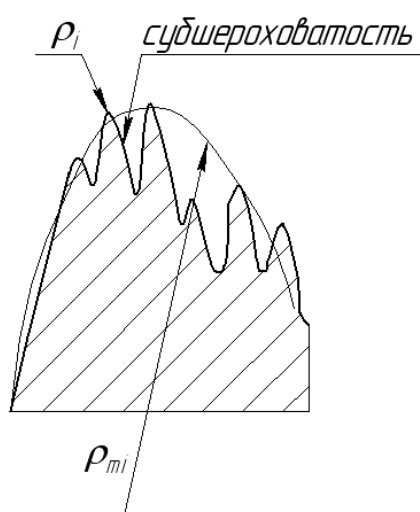


Рисунок 2. – Модельное представление единичной неровности.

Совокупность мельчайших микронеровностей (см. рис. 2.), которые накладываются на шероховатость поверхности, согласно [2], представляет собой субшероховатость. В работе [1] показано, что субшероховатость характеризует особый вид неровностей, механизм возникновения которого связан с внутренним строением металла и его дефектной структурой, формирующейся на стадиях механической обработки и эксплуатации.

1.2 Анализ влияния микрогеометрии поверхности на ее эксплуатационные показатели

В настоящее время в литературе имеется достаточное количество экспериментальных и теоретических данных о влиянии микрогеометрии поверхности на ее эксплуатационные характеристики [2, 4, 5, 6, 14, 15]. В таблице 2 приведены некоторые данные по влиянию вида механической обработки на качество обработанной поверхности.

Для ответственных поверхностей, обрабатываемых на чистовых операциях после точения и шлифования нормируют не только высотные параметры, но и шаговые S_m , S , а так же параметр относительной опорной длины t_p , так как они обеспечивают комплекс функциональных свойств (таблица 3).

Таблица 2. Влияние вида обработки на качество поверхностного слоя

Вид обработки	Параметры качества поверхностного слоя		
	R_a , мкм	S_m , мм	R_p , мкм
Точение:			
черновое	12-40	0,32-1,23	32-120
получистовое	2-16	0,16-0,4	5-50
чистовое	0,8-2,5	0,08-0,16	2-8

В работе [4] приведены данные по влиянию параметров качества поверхности на эксплуатационные свойства деталей машин. В таблице 4 представлены данные о взаимосвязи показателей микрогеометрии поверхности с ее эксплуатационными характеристиками. Как следует из анализа таблицы практически на все эксплуатационные характеристики поверхности оказывает вся совокупность микрогеометрических показателей, количественно характеризующих топографию поверхности.

Таблица 3. – Эксплуатационные свойства поверхности и обеспечивающая их номенклатура параметров шероховатости

Эксплуатационное свойство поверхности	Параметры шероховатости поверхности и характеристики, определяющие эксплуатационное свойство
Износостойкость	$R_a (R_z)$
Стойкость к вибрациям	$R_a (R_z), S_m, S,$
Жесткость	$R_a (R_z), t_p$
Прочность	$R_a (R_z)$
Прочность при знакопеременных нагрузках	$R_{max}, S_m, S,$
Герметичность	$R_a (R_z), R_{max}, t_p$

Таблица 2. – Взаимосвязь эксплуатационных свойств деталей с параметрами качества поверхности

Эксплуатационные свойства	Параметры качества поверхностного слоя					
	R_a, R_z	R_{max}	S_m	S	t_p	R_p
Жесткость	-	-	+	0	+*	-*
Коэффициент трения	+	+	-	-	-*	+*
Износостойкость	-	-	+*	+	+*	-*
Герметичность	-	-	-*	-	+*	-*
Прочность посадок	-	-	-	0	+*	-*
Усталостная прочность деталей	-	-*	+*	0	-	+
Стойкость к коррозии	-*	-	+*	+*	+	-
Теплостойкость	-	-	+	0	+	-

1.3 Методы количественной оценки топографии поверхностей с помощью аппарата фрактальной геометрии

В последнее время для оценки шероховатости поверхности применяется теория фракталов и фрактальной размерности [1, 13, 19, 20]. Применение фрактального анализа к оценке шероховатости микрорельефа обработанных поверхностей рассмотрены в работах отечественных и зарубежных ученых М.И. Кулака, В. С. Ивановой, М.А. Измеровым, С.Н. Кульковым, С.А. Клименко, В.И. Курдюковым, П.С. Лабутиным, П.М. Огаром, О.В. Опрышко, С.С. Yuan, J. Li, X.P. Yan, Z. Peng, D.J. Whitehouse, T. K. Varman¹, P Sahoo, V. Hotař. В этих работах профиль шероховатой поверхности представляется как фрактальная структура, позволяющая оценить шероховатость поверхности независимо от формы ее элементов и плотности их распределения. Анализ работ в области оценки микропрофиля поверхности с помощью фрактальной геометрии показал перспективность данного научного направления.

Методы обработки концентрированными потоками энергии [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] вносят существенные изменения в формирование топографии поверхности. Для таких случаев применение классических геометрических показателей для количественной оценки микрогеометрии поверхности является не информативным и, таким образом, требуются новые, более совершенные методы оценки топографии поверхности. Одним из перспективных направлений в этой области является применение фрактальной геометрии. При этом поверхность рассматривается как фрактальная (дробная) структура и в тоже время состоящая из мельчайших самоподобных «конструктивных» элементов. Такая оценка позволяет выявить возможный самоподобный элемент, а представление всей поверхности будет являться как результат повторения этого элемента, причем это «повторение» может иметь определенную закономерность.

«Понятие «фрактала» впервые введенное Мандельбротом [19]— математическое множество, обладающее свойством самоподобия, то есть однородности в различных шкалах измерения (любая часть фрактала подобна всему множеству целиком). В математике под фракталами понимают множества точек в евклидовом пространстве, имеющие дробную метрическую размерность (в смысле Минковского или Хаусдорфа), либо метрическую размерность, отличную от топологической, поэтому их следует отличать от прочих геометрических фигур, ограниченных конечным числом звеньев [19]».

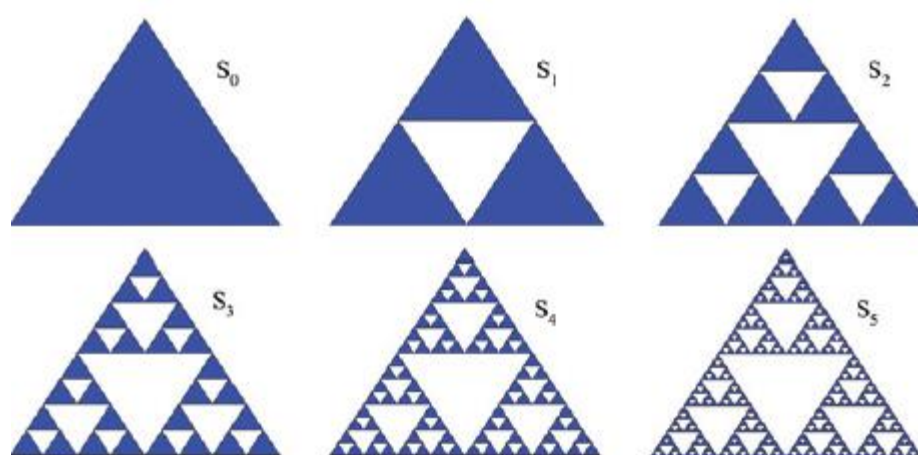


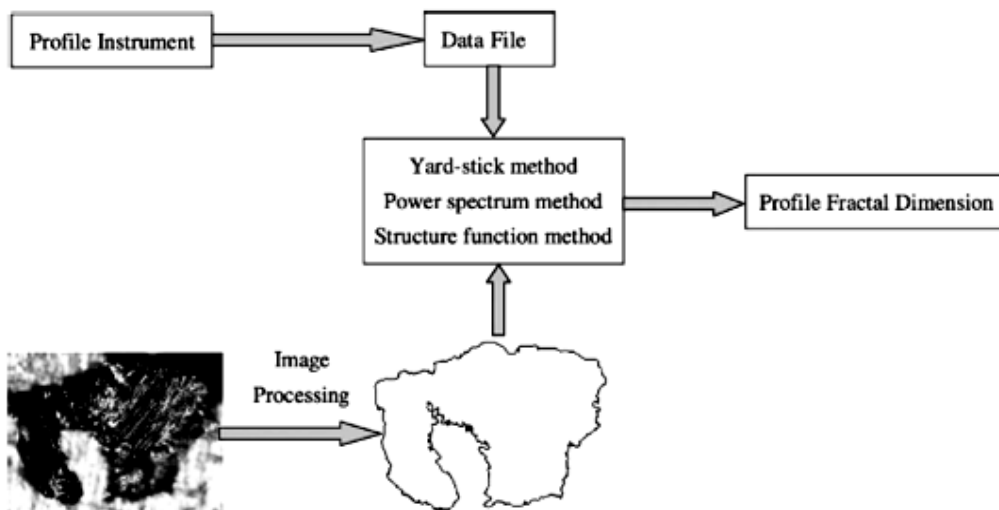
Рисунок 3. – Построение ковра Серпинского с помощью фракталов [19].

В зависимости от объекта исследования различают расчет фрактальной размерности шероховатого профиля, т.е. 2D фрактальной структуры и расчет фрактальной размерности шероховатой поверхности – 3D фрактальной структуры [13].

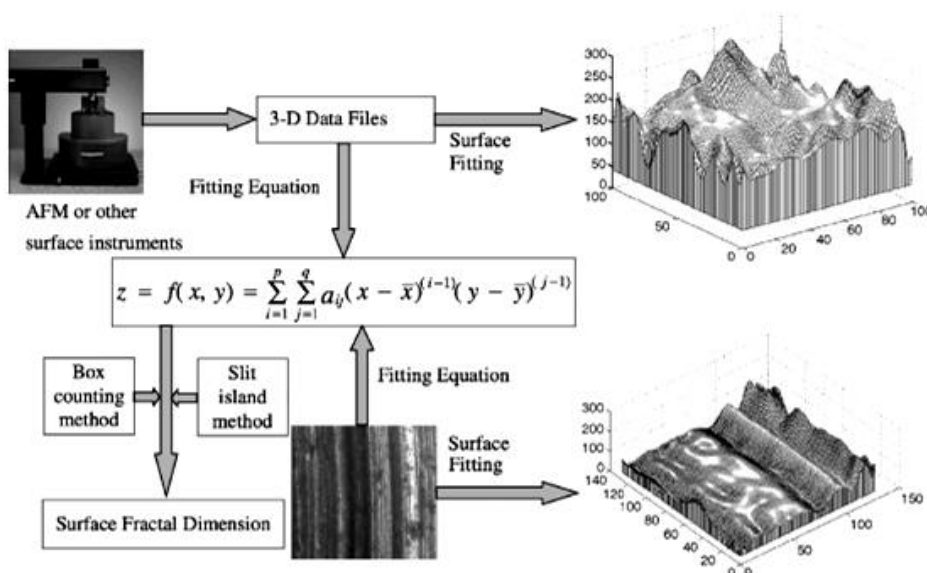
Для расчета фрактальной размерности 2D профиля применяют следующие методы: критериальный метод (yardstick method), вариационный метод (variation), метод структурных функций (the structure function), метод «презизионного» анализа (Precision analysis) и метод, основанный на анализе мощности спектра изучаемой фрактальной структуры (power spectrum method). Для расчета фрактальной размерности поверхности (3D структура) известны такие методы как метод покрытий

(box counting), Slit island method (SIM) (метод островного разреза), а также метод «презизионного» анализа (Precision analysis).

Принцип расчета фрактальных характеристик 2D и 3D структур с использованием выше перечисленных методов схематично представлен на рис. 4.



а)



б)

Рисунок 4. – Схема расчета фрактальных характеристики 2D (а) и 3D (б) структур

Фрактальность обработанных поверхностей, особенно после интенсивной механической обработки, предполагает возможность кластерного механизма формирования поверхности. При этом сама поверхность рассматривается как самоподобная, иерархически упорядоченная на определенном уровне, структура. Такая модель позволяет не только прогнозировать механизмы формирования шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, но и управлять ими [13].

1.4 Выводы по разделу

На основе проведенного аналитического обзора можно сделать вывод, что, во-первых, современные технологии обработки поверхностей пока еще не имеют четко установленных нормативов, особенно при использовании дополнительных ультразвуковых источников энергии и их оценки, и, во-вторых, необходимы новые подходы в оценке микрогеометрии поверхности и одним из таких подходов может быть использование теории фракталов.

2 Методика экспериментальных исследований

2.1 Оборудование, инструмент и оснастка

Для проведения экспериментальных исследований использовали токарный станок с ЧПУ модели 16Б16П (рис 5.), оснащенный устройством для ультразвуковой упрочняющей обработки. На станке производили предварительную обработку черновым и чистовым точением и алмазным выглаживанием.



Рисунок 5. – Модернизированный токарный станок с ЧПУ мод. 16П16Т1С1

В револьверной головке станка размещали ультразвуковую головку для выглаживания, изображенную на рис. 6. Инструментами для ультразвуковой упрочняющей обработки служили алмазные наконечники 1 (ТУ2-037-100-84Е, исполнения I, II) со вставками из природного алмаза со сферической рабочей частью радиусами $R=3$ мм, соединенные через резьбу с переходником (рис. 7.).

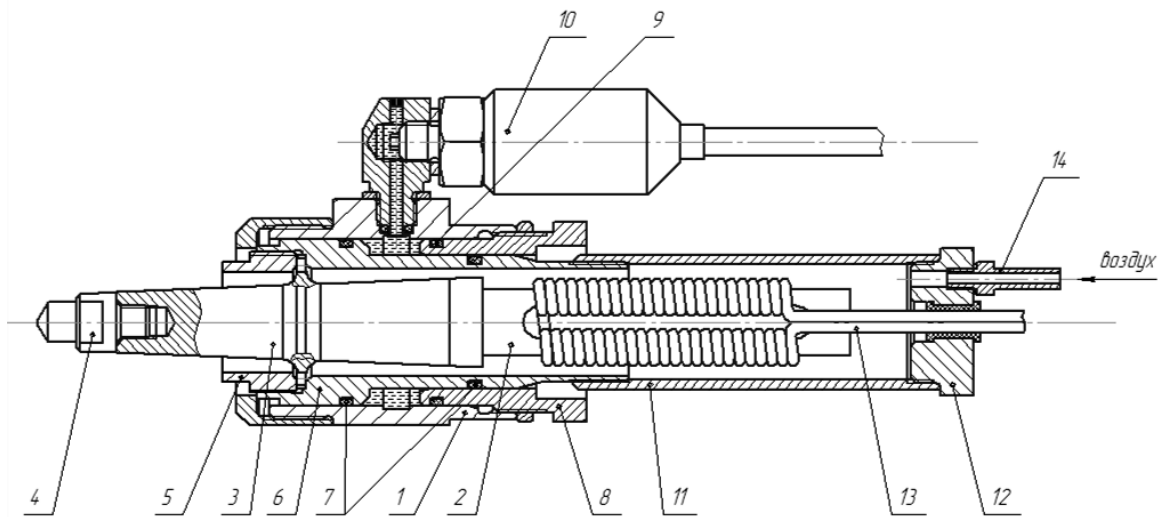


Рисунок 6. – Конструкция ультразвуковой головки для выглаживания.

Переходник с помощью резьбы закрепляли на рабочем торце концентратора-волновода ультразвуковой головки.

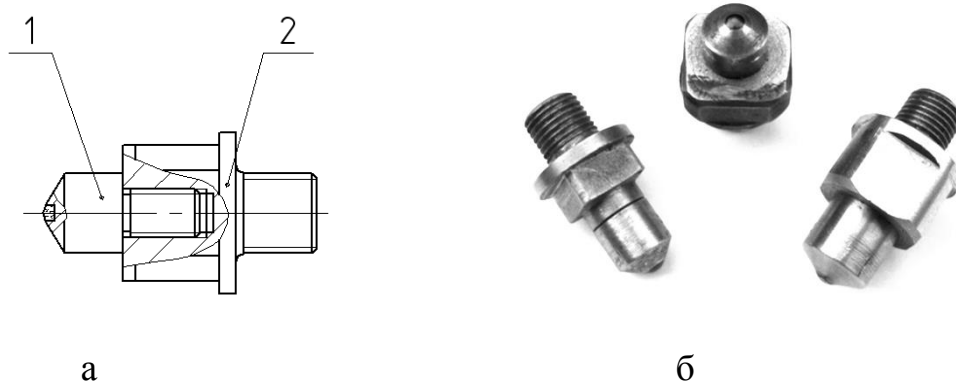
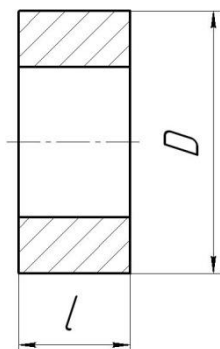


Рисунок 7. – Инструмент для УЗ-выглаживания: а) схема инструмента: 1 – выглаживатель ТУ2-037-100-84Е, 2 – переходник; б) фотографии инструментов

2.2 Образцы для исследований и режимы обработки

В качестве образцов применяли специально изготовленные цилиндрические кольца (рис. 8) из следующих материалов: из жаропрочной коррозионностойкая стали 12X18H10T (HB 220) и закаленной стали ХВГ (HRC 60...63).



а)



б)

Рисунок 8. - Эскиз (а) и фото (б) образца для проведения экспериментальных исследований

Обработку всех образцов производили по плоской торцовой поверхности с целью исключения влияния кривизны поверхности в случае обработке по цилиндрической поверхности.

Методы и режимы обработки образцов.

Предварительную обработку образцов осуществляли шлифованием на плоскошлифовальном станке и твердым точением. Режимы и условия обработки приведены в таблице 3. Режимы предшествующей обработки шлифованием и точением выбирали исходя из рекомендованных для данных марок материала. Образцы из стали ХВГ после токарной обработки подвергались термической обработки – закалкой до твердости 60...63 единиц по HRC. После закалки образцы подвергались плоской шлифовки.

Таблица 3. - Применяемый инструмент и режимы механической обработки образцов

	Точение черновое	Точение чистовое	Шлифование	Алмазное выглаживание	
				с УЗК	без УЗК
Инструмент	резец PDJNR 2525 M15; пластина DNMG15061 2	резец PCLNR 2525 M12; пластина CNMG12040 8	шлифовальный круг 24A40C16K5	Наконечник для алмазного выглаживания с вставкой из природного алмаза	
Режимы обработки	$v = 120$ м/мин; $s = 0,2$ мм/об $t_1 = 0,2$ мм	$v = 140$ м/мин; $s = 0,08$ мм/об $t_2 = 0,1$ мм	$v_{кр} = 35$ м/с; $v_{см} = 0,1$ м/с $t_3 = 0,05$ мм	$v = 35$ м/мин; $s = 0,1$ мм/об $R = 3$ мм	
				$\xi = 9$ мкм $f = 22$ кГц	—

После обработки каждого образца производили измерение шероховатости торцевой поверхности, построение ее профилограммы и ее фотографирование на оптическом микроскопе.

В ходе экспериментального исследования устанавливали корреляционную зависимость между параметрами шероховатости и величиной фрактальной размерности.

2.3. Методика измерения шероховатости обработанных образцов

Измерение шероховатости образцов производилось на профилометре-профилографе Mitutoyo Surftest SJ-210 (рис. 9, 10), качественная оценка топографии образцов выполнялась на оптическом микроскопе Axiovert 40MAT. Измерение каждого образца повторяли 5 раз и фиксировали среднее значение показателей шероховатости. Полученные профилограммы каждого образца использовали в качестве статистических данных.

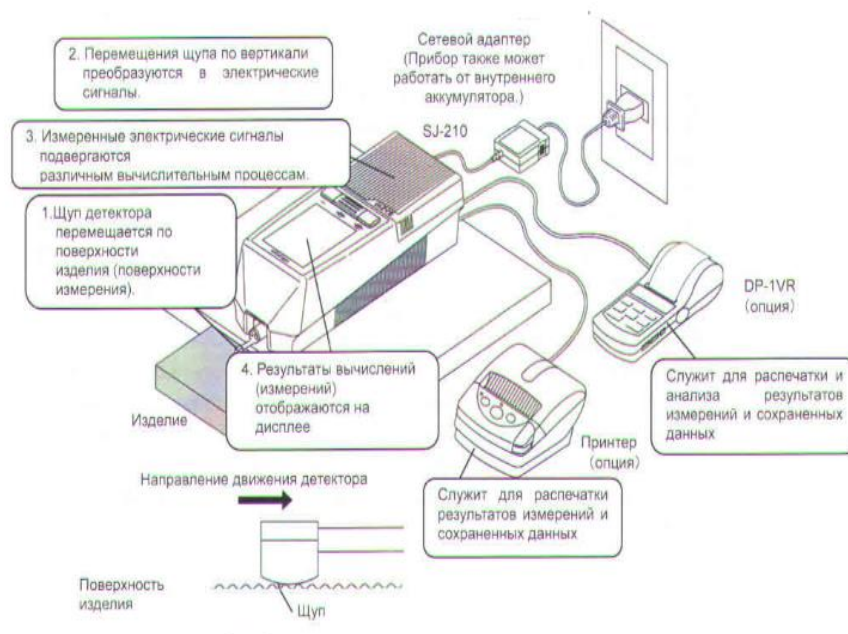


Рисунок 9. – Процесс измерения при помощи прибора SJ-210, подключение к дополнительному оборудованию.



Рисунок 10. – Процесс измерения шероховатости профилометром-профилографом Mitutoyo SurfTest SJ-210

2.4 Выводы по разделу

Разработанная методика экспериментальных исследований охватывает максимально возможное количество факторов и позволяет адекватно оценить микрогеометрию поверхности с применением теории фракталов

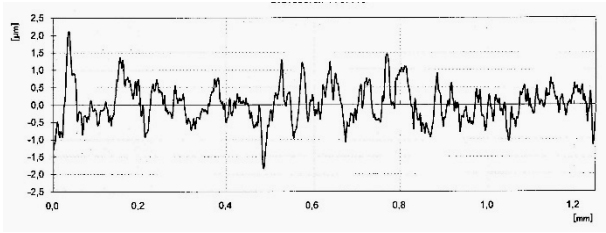
3 Результаты экспериментальных исследований формирования шероховатости поверхности в процессе механической обработки

3.1 Результаты исследования предварительной обработки образцов

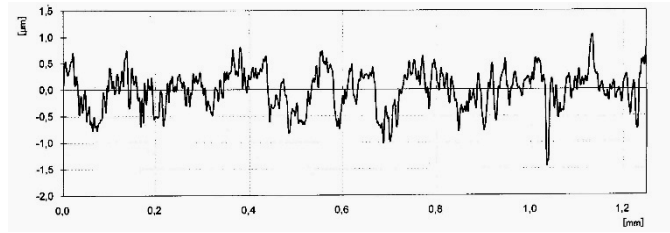
Учитывая технологическую последовательность обработки образцов с целью выявления закономерностей каким образом изменяется микрогеометрия поверхности и, соответственно, ее фрактальная размерность, представление результатов экспериментального исследования также будем представлять поэтапно после шлифования, точения и выглаживания.

Так, на рис. 12 и 13 представлены результаты измерения и фотографирования шероховатости поверхности образцов после обработки шлифованием. Как следует из анализа рисунков сформированная топография поверхности образцов характерна для абразивной обработке, когда на поверхности наблюдаются следы от микрорезания абразивными зернами. Анализ данных показывает, что условия шлифования и состояние шлифовального круга оказывают существенное влияние на показатели шероховатости поверхности. Так, например, из сравнения результатов топографии поверхностей, обработанных обычным шлифованием (ОШ) и ультразвуковым шлифованием (УЗШ) следует, что для поверхностей после УЗШ наблюдаются синусоидальные риски, обусловленные дополнительным, осциллирующим движением шлифовального круга при наложении на него ультразвуковых колебаний.

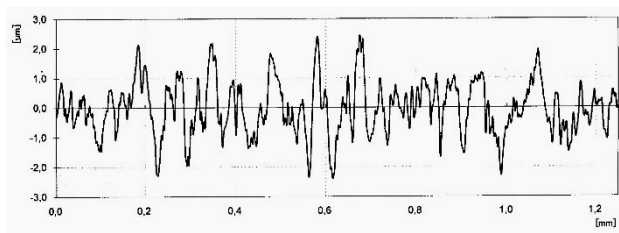
Также стоит отметить, как следует из анализа таблицы 5, статистические количественные показатели шероховатости поверхности после различных условий шлифования также отличаются.



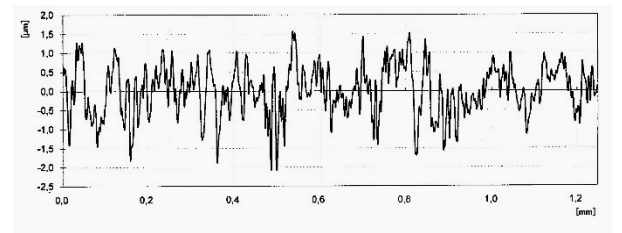
а)



б)



в)



г)

Рисунок 13. – Фотоснимки поверхностей образцов после различных условий шлифования

Таблица 5. – Результаты измерения шероховатости поверхности образцов

Вид обработки	Средние значения параметров шероховатости, мкм		Величина размаха, мкм		Средне-квадратичное отклонение		Дисперсия	
	$\langle Ra \rangle$	$\langle Rz \rangle$	R_{Ra}	R_{Rz}	σ_{Ra}	σ_{Rz}	D_{Ra}	D_{Rz}
	ОШ+ОП	0,4	2,486	0,135	1,0	0,051	0,408	0,0026
УЗШ+ОП	0,327	1,815	0,046	0,168	0,018	0,069	0,00032	0,004766
ОШ+УЗП	0,68	3,88	0,117	0,818	0,046	0,312	0,0021	0,0976
УЗШ+УЗП	0,567	3,262	0,1	0,605	0,0441	0,242	0,0019	0,0587

3.2 Результаты исследований после различных методов механической обработки

На рис. 14 представлены результаты измерения шероховатости поверхности образцов после обычного (ОВ) и ультразвукового выглаживания (УЗВ).

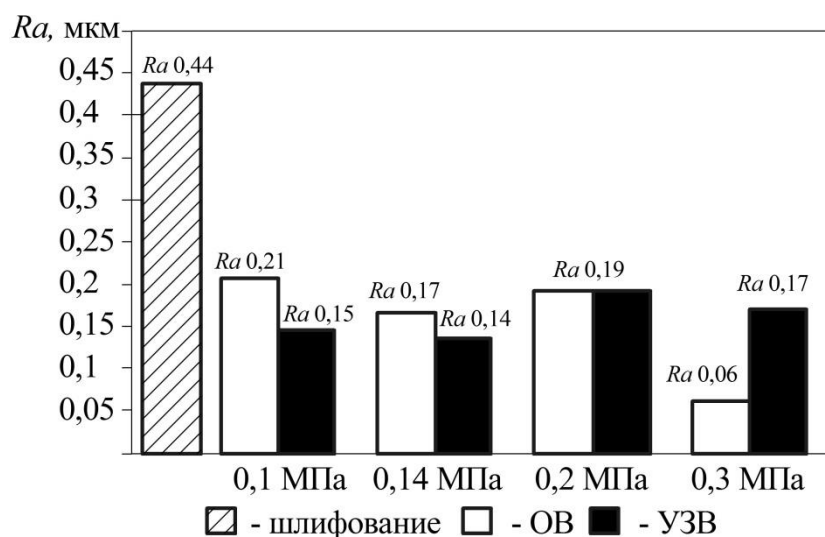


Рисунок 14. – Значение среднеарифметического отклонения профиля поверхности (параметр Ra) после обработки шлифованием, обычным (ОВ) и ультразвуковым (УЗВ)

Из рис. 14 следует, что процесс упрочняющей обработки как с наложением УЗК, так и без них, способствует снижению шероховатости поверхности практически в два раза по сравнению с исходной шероховатостью после шлифования.

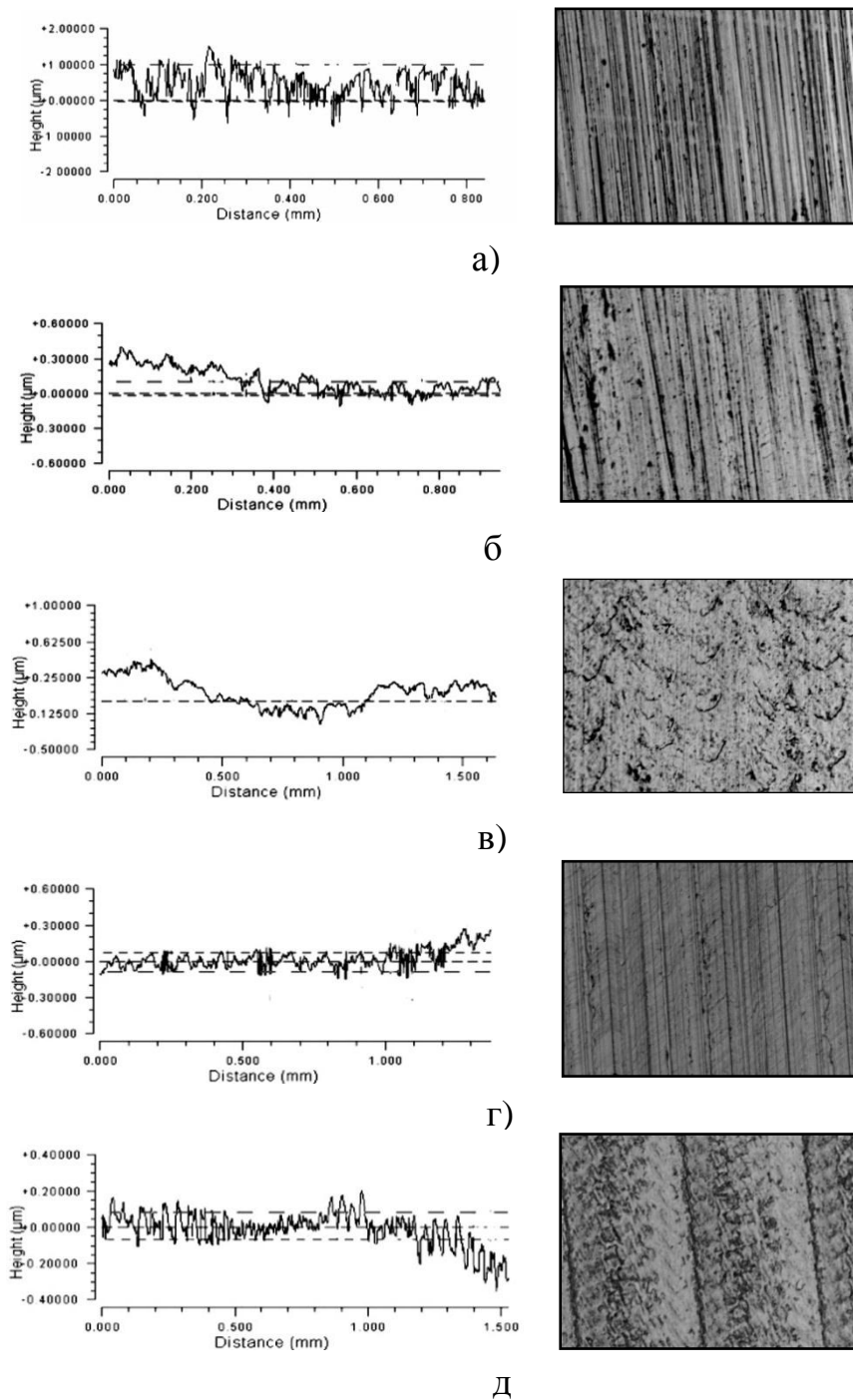


Рисунок 15. – Профилограммы и фотоснимки поверхностей образцов после шлифования (а), обычного (ОВ) и ультразвукового (УЗВ) выглаживания (б – д): б) ОВ с усилием 0,1 Мпа; в) УЗВ с усилием 0,1 Мпа;

Наложение на выглаживающий инструмент ультразвуковых колебаний приводит еще к более существенному сглаживанию микронеровностей в результате действия дополнительной знакопеременной нагрузки от колеблющегося инструмента (рис. 15).

Сравнительный анализ фотографий поверхности показывает существенную разницу при различных методах обработки. Причем интересно отметить, что различия наблюдаются как в текстуре поверхности, так и профилограммах.

На рис. 16 представлены трехмерные топографии поверхностей после твердого точения, обычного и ультразвукового выглаживания, полученные с помощью лазерного сканирующего микроскопа.

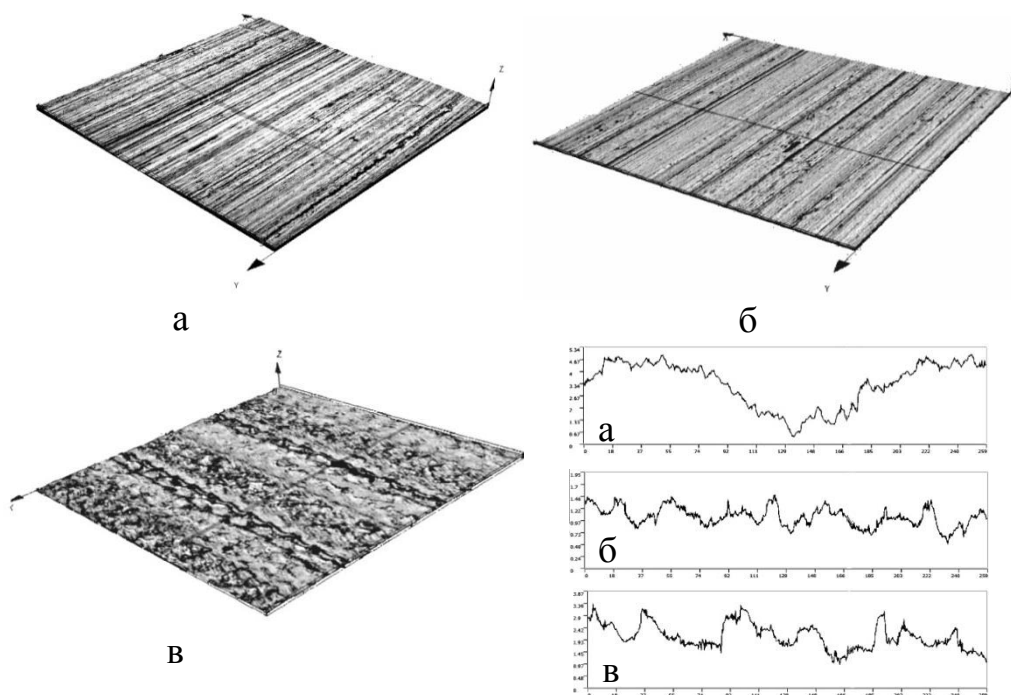
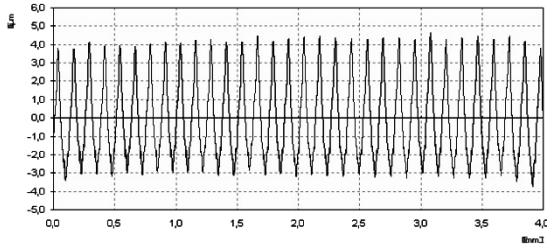
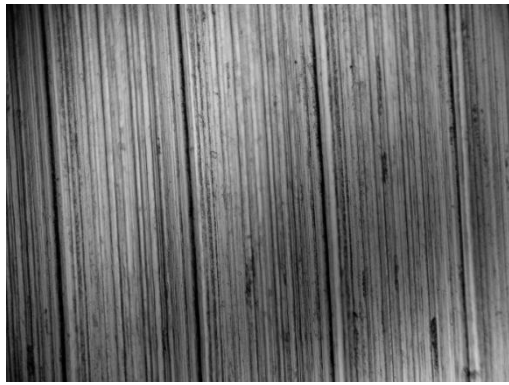


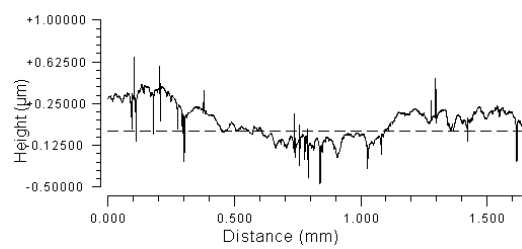
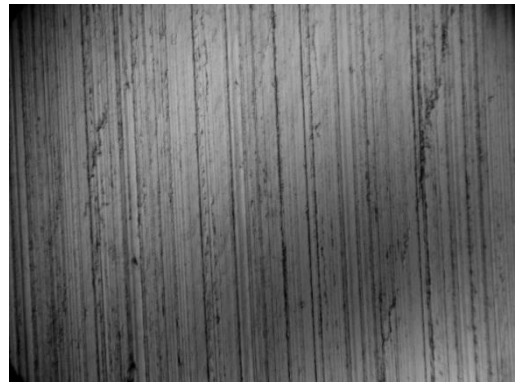
Рисунок 16. – Трехмерная топография поверхностей после твердого точения (а), обычного выглаживания (б) и ультразвукового выглаживания (в)

На рис. 17 представлены фотоснимки топографии поверхностей образцов, обработанных твердым точением, шлифованием, обычным и ультразвуковым выглаживанием» [16, 17].



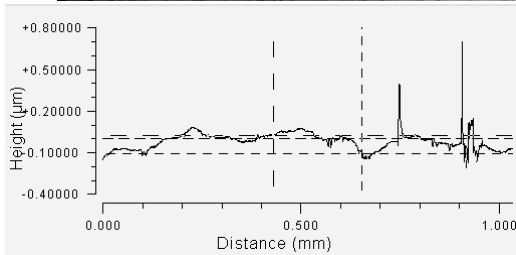
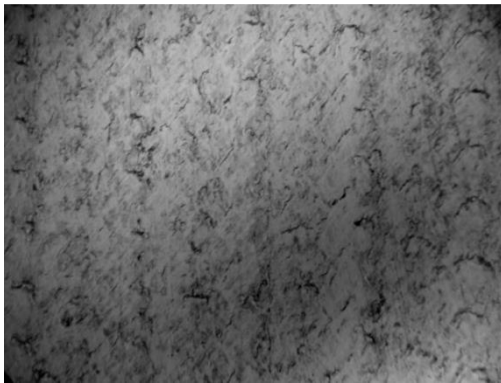
Среднее значения $Ra=1,892$ мкм

а)



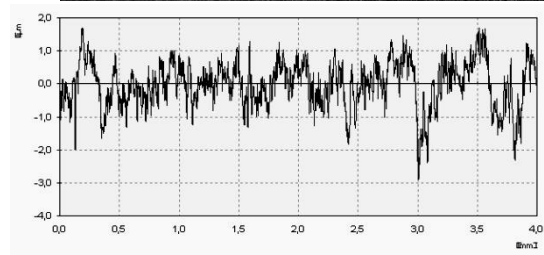
Среднее значения $Ra=0,128$ мкм

б)



Среднее значения $Ra=0,078$ мкм

а)



Среднее значения $Ra=0,556$ мкм

б)

Рисунок 15. – Фотоснимки топографии поверхностей образцов, обработанных твердым точением, шлифованием, обычным и ультразвуковым выглаживанием

Как следует из анализа фотографий и профиллограмм ультразвуковое выглаживание позволяет полностью сгладить исходный профиль, оставшийся после предыдущей обработки.

3.3 Выводы по разделу

На основании выполненных экспериментальных исследований по изучению влияния различных методов обработки, условий и режимов обработки на формирование шероховатости поверхности позволяет сделать следующий вывод, что показатели шероховатости обрабатываемых поверхностей зависят не только от методов механической обработки, но и от технологической последовательности обработки. Кроме того, параметр шероховатости действительно является результатом «копирования» следа от движения инструмента. Однако, при комбинированной обработки, когда вводится дополнительный источник энергии, в данном случае энергии ультразвука, то формирование новой поверхности уже практически не является как результат от следа, оставленного инструментом.

4 Результаты расчета фрактальной размерности обработанных образцов

4.1. Методика расчета фрактальной размерности

4.1.1 Расчет фрактальной размерности по результатам обработки оптических изображений топографии поверхностей

Расчет фрактальной размерности проводили в компьютерной программе MATLAB. В программу загружали исходные полутоновые изображения сфотографированных на оптическом микроскопе образцов, используя следующие команды:

```
I = imread('rice.png');
```

```
imshow(I)
```

Результат представлен на рис. 17



Рисунок 17. – Исходное полутоновое изображение обработанной поверхности

По уровню яркости пикселя в программе выполняли параметрическое построение поверхностей в 3D. Это дает возможность косвенной оценки в 3D топографии поверхностей после различных методов обработки.

На рис. 18 приведен пример построения параметрической поверхности, фотография которой изображена на рис. 17

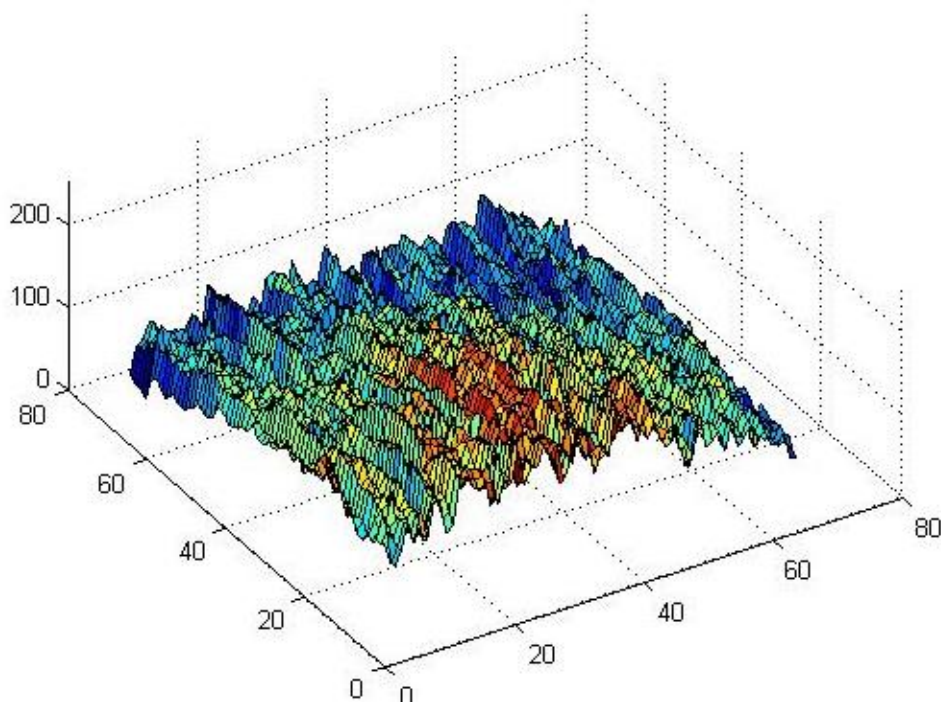


Рисунок 18. – Параметрическая поверхность изображения по рис. 17

Далее исходные полутоновые изображения, загруженные в MATLAB, подвергали обработки с целью выравнивания его яркости; фона изображения и улучшения его контраста. Заключительным этапом подготовки изображения являлось его конвертация в бинарный вид (рис. 19), в котором каждому пикселю соответствует значение 1 или 0, т.е. изображение представляется в виде матрицы (рис. 20).

Расчет фрактальной размерности полученного бинарного изображения рассчитывали по алгоритму покрытия фрактальной структуры элементарной единичной площадкой с подсчетом количества покрытий в зависимости от вариации размеров единичной площадки. Аппроксимацию результатов выполняли в логарифмическом масштабе.

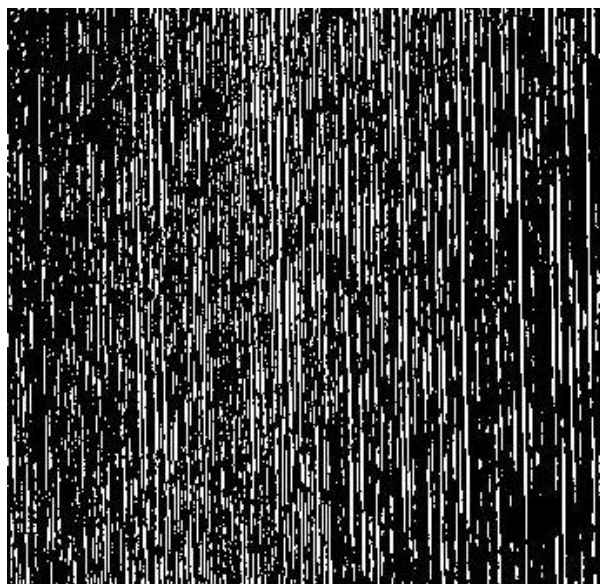


Рисунок 19. – Бинарное изображение

0, 0, 0, 0,	0, 1, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	1, 1, 0, 1,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	1, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 1, 0, 0,	1, 1, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	1, 1, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	1, 1, 0, 1,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	0, 1, 1, 1,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 1, 1,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	1, 1, 0, 0,	0, 0, 1, 1,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 1,	0, 0, 1, 0,	0, 1, 1, 1,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 1, 1, 1,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 1, 1,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,
1, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	1, 1, 0, 0,	0, 0, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	1, 1, 0, 0,	1, 1, 0, 0,
0, 0, 0, 0,	0, 0, 0, 0,	0, 0, 1, 1,	1, 1, 0, 0,

Рисунок 20. – Численная матрица бинарного изображения

На рис. 21 в графическом виде приведен результат расчета фрактальной размерности в MATLAB. Угол наклона аппроксимирующей прямой представляет собой величину фрактальной размерности изображения.

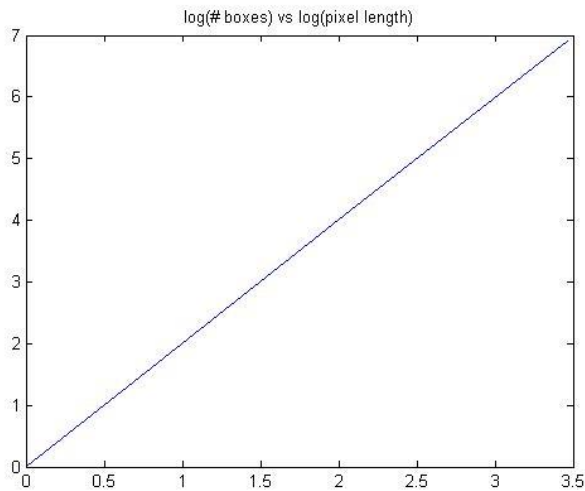


Рисунок 21. – Результат расчета фрактальной размерности с использованием ПО MATLAB

4.1.2 Расчет фрактальной размерности по результатам статистической обработки профиллограмм

Результаты измерения шероховатости поверхности с помощью профиллографа-профилометра, описанного в разделе 2, позволяет записать их в виде некоторого числового статистического ряда замеров высот и впадин профиля поверхности. Это статистический ряд возможно считать с помощью MS Excel и всю дальнейшую обработку записанного ряда произвести в Excel. На рис. 22 представлен пример такого статистического ряда и соответствующая ему профиллограмма поверхности.

«Методика расчета фрактальной размерности по статистическим данным о записанных значениях высот и впадин профиля заключается в следующем. Загружаем количественные данные о профиллограмме в Excel в виде статистического ряда и по формуле (11) рассчитываем среднее выборочное значение высот профиля (параметра X) на исследуемой длине L :

$$X(L) = \frac{1}{L} \cdot \sum X(l) \quad (11)$$

Далее, по формуле (12) для каждый значений высот профиля рассчитываем их отклонение от среднего значения и по формуле (13) определяем

величину размаха:

$$X(l, L) = \sum (X(U) - X(L)) \quad (12)$$

$$R(L) = \max X(l, L) - \min X(l, L) \quad (13)$$

В литературе по фракталам [13, 19, 21, 22, 23] показано что, для многих рядов нормированный размах (размах, отнесённый к среднему квадратическому отклонению S) хорошо описывается степенной зависимостью

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{L}{2}\right)^H, \quad (14)$$

где H - показатель (или коразмерность) Хёрста.

Величина фрактальной размерности связана с показателем Херста следующим простым соотношением»:

$$D = 2 - H \quad (15)$$

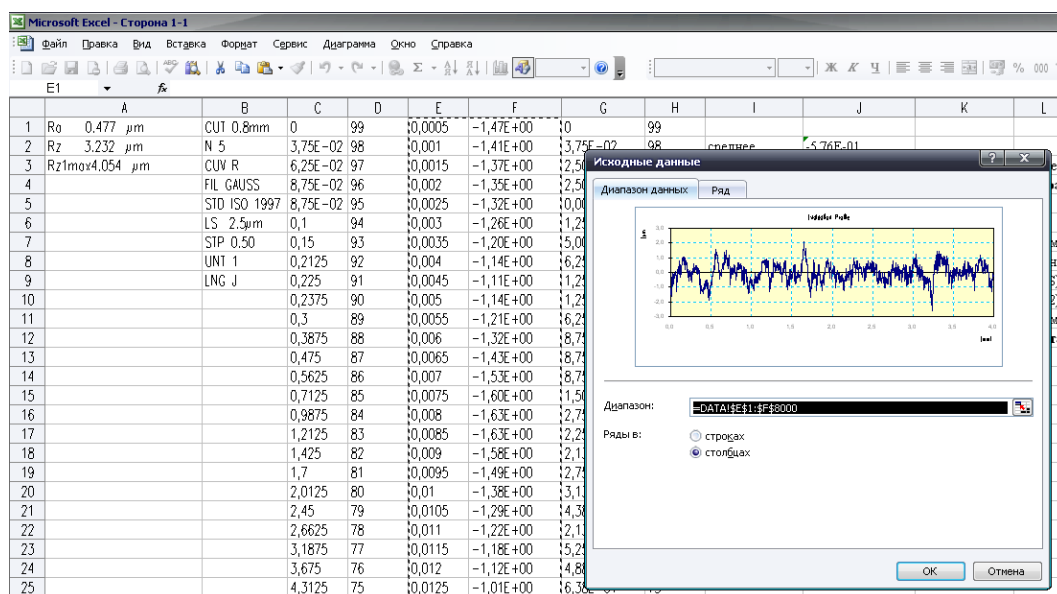


Рисунок 22. – Статистический ряд измеренных значений высот и впадин профиля и его графическая интерпретация в виде профилограммы

В таблице 7 приведен пример результата расчета фрактальной размерности по статистическим данным профилограммы.

Таблица 7. – Результат расчет фрактальной размерности по статистическим данным

Наименование параметра	Значение
Среднее значение высот и впадин профиля	-7,52E-03
Среднеквадратичное отклонение S	0,605197829
Минимальное значение впадины X _{min}	-2,63E+00
Максимальное значение высоты X _{max}	2,08E+00
Размах, R	4,71E+00
Длина трассировки, L	4,00E+00
IOG (R/S)	0,891114786
LOG(L/2)	0,301029996
Коразмерность Херста, H	0,59008479
Фрактальная размерность, D	1,40991521

4.2. Результаты расчета фрактальной размерности обработанных поверхностей

На рис. 23 приведены, построенные в MATLAB 3D параметрические поверхности образцов, по результатам обработки исходных изображений топографии поверхностей, полученные с помощью микроскопа. Данные 3D поверхности получены с помощью 3D «визуализации» яркости пикселя исходного изображения. По ним возможно косвенно оценить микрогеометрию поверхности в объеме, т.е. оценить некоторую степень «хаотичности» профиля поверхности. Так, например, профиль, изображенный на рис. 23 а имеет более детерминированный рельеф, обусловленный упорядоченным расположением борозд от абразивных зерен, в сравнении с другими 3D поверхностями (рис. 23 б, в, г) на которых более выражена случайная составляющая профиля.

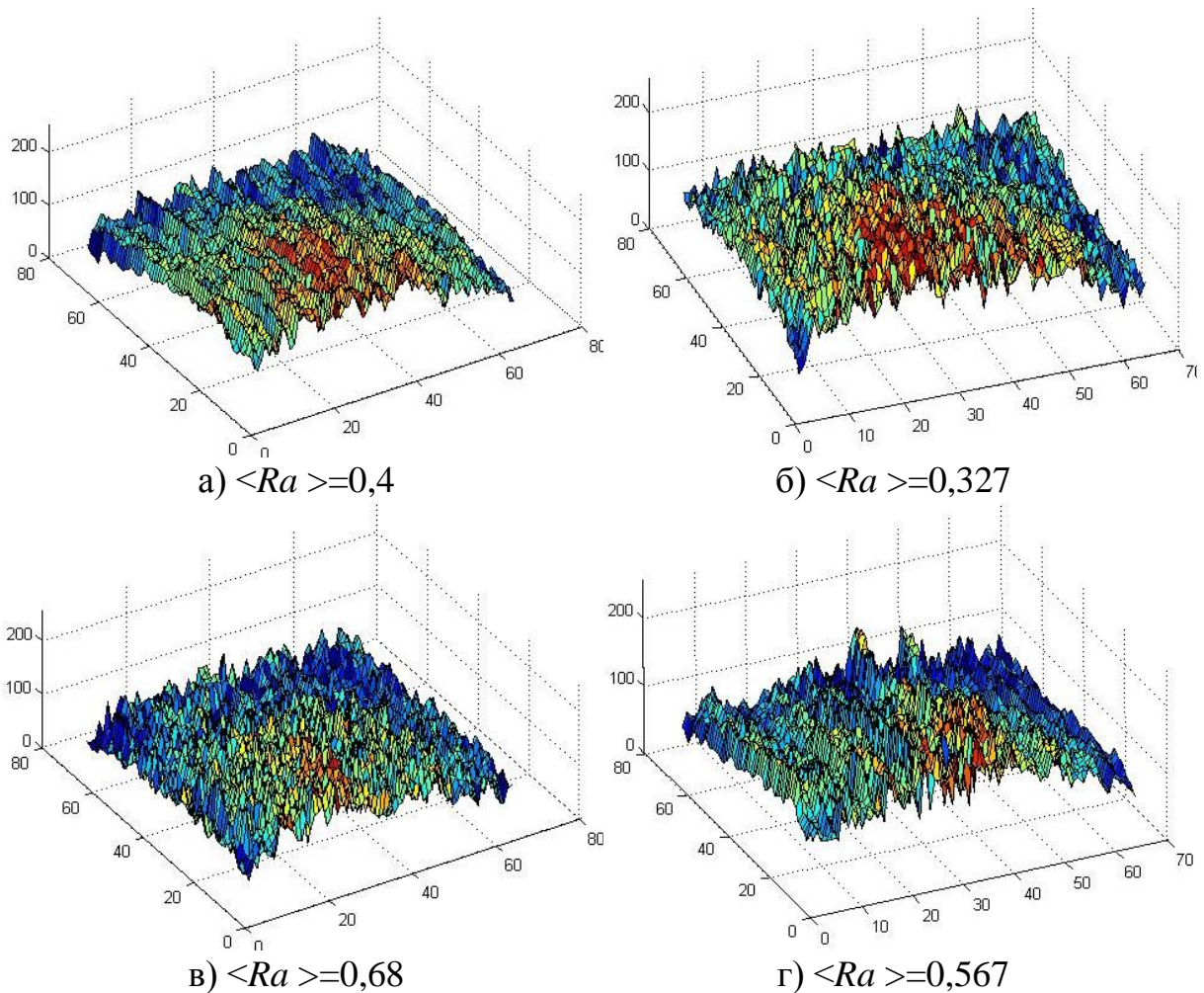


Рисунок 23. – Параметрическая поверхность образцов: а) после обычного шлифования и обычной правки круга; б) после ультразвукового шлифования и обычной правки круга; в) после обычного шлифования и ультразвуковой правки круга; г) после ультразвукового шлифования и ультразвуковой правки круга.

Для количественной оценки профиля поверхности выполнен анализ ее топографии с привлечением аппарата фрактальной геометрии по ранее изложенной методике.

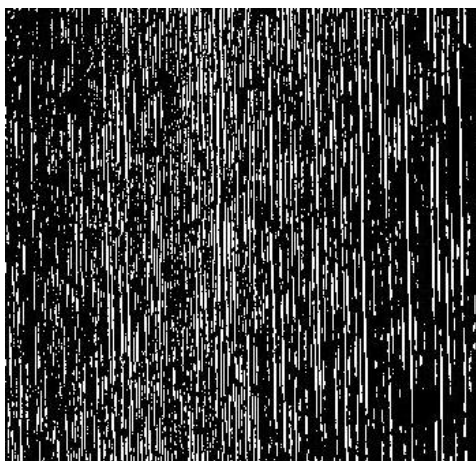
Результат создания бинарного изображения топографии обработанных поверхностей и рассчитанные значения фрактальной размерности приведены на рис. 24. В таблице 8 сопоставлены средние значения параметра шероховатости и величины фрактальной размерности,

полученные расчетом по оптическим изображениям и по результатам профилографирования

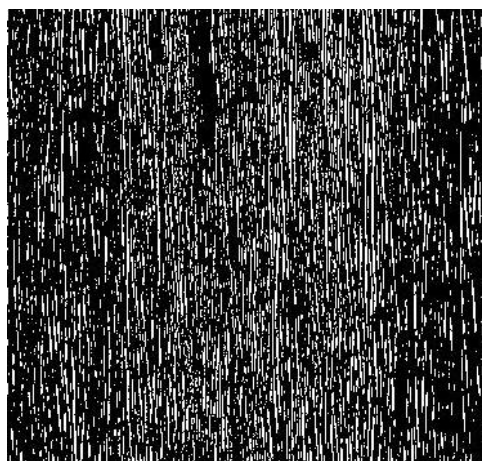
Таблица 8. – Результаты измерения шероховатости поверхности и расчета фрактальной размерности после различных методов обработки

Вид обработки	Среднее значение параметра $\langle Ra \rangle$, мкм	Величина фрактальной размерности по оптическим изображениям, D	Величина фрактальной размерности по результатам обработки профилограмм, D
ОШ+ОП	0,4±0,153	1,9965	1,5088
УЗШ+ОП	0,327±0,054	1,9959	1,528
ОШ+УЗП	0,68±0,138	1,9992	1,6229
УЗШ+УЗП	0,567±0,132	1,9984	1,5442

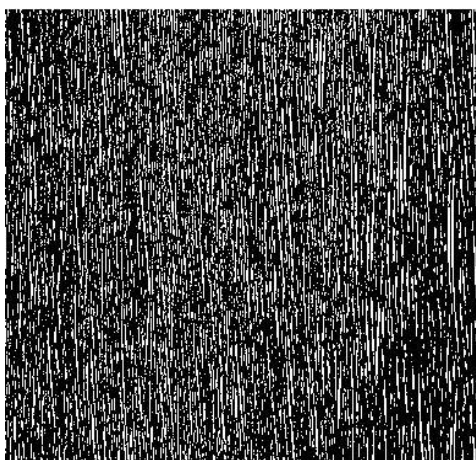
На рис. 25 приведена графическая зависимость величины фрактальной размерности D с параметром шероховатости Ra . Видно, что имеется линейная связь стандартного показателя микрогеометрии поверхности с величиной фрактальной размерности. На шлифованных поверхностях образцов наблюдается рельеф, характерный для абразивной обработки и представляет собой следы от микрорезания абразивными зёрнами. Установлено, что микрорельеф поверхности после шлифования кругом с УЗП характеризуется более шероховатый, чем шлифованной кругом с ОП. Это связано с тем, что шлифовальный круг после УЗП обладает большим количеством разрушенных абразивных зёрен и соответственно на поверхности наблюдается значительное количество следов от микрорезания. Ультразвуковая правка способствует повышению режущей способности шлифовального круга как раз за счет наличия «острых» абразивных кромок, которые и осуществляют процесс микрорезания.



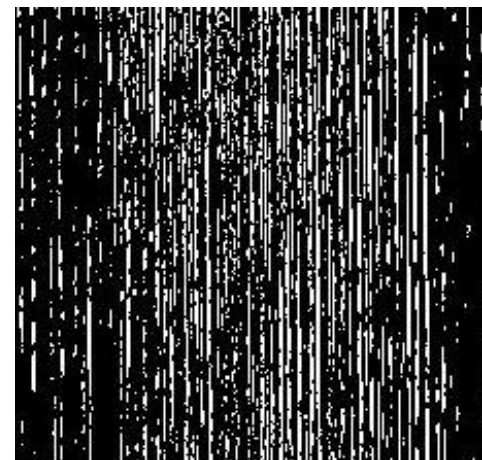
а) $D=1,9965$



б) $D=1,9959$



в) $D=1,9992$



г) $D=1,9984$

Рисунок 24. – Бинарные изображения поверхностей как фрактальные структуры: а) после обычного шлифования и обычной правки круга; б) после ультразвукового шлифования и обычной правки круга; в) после обычного шлифования и ультразвуковой правки круга; г) после ультразвукового шлифования и ультразвуковой правки круга

Выполненные экспериментальные исследования по оценке фрактальной размерности обработанных поверхностей позволяют сделать заключение о возможности оценки режущей способности шлифовального круга на основе аппарата фрактальной геометрии.

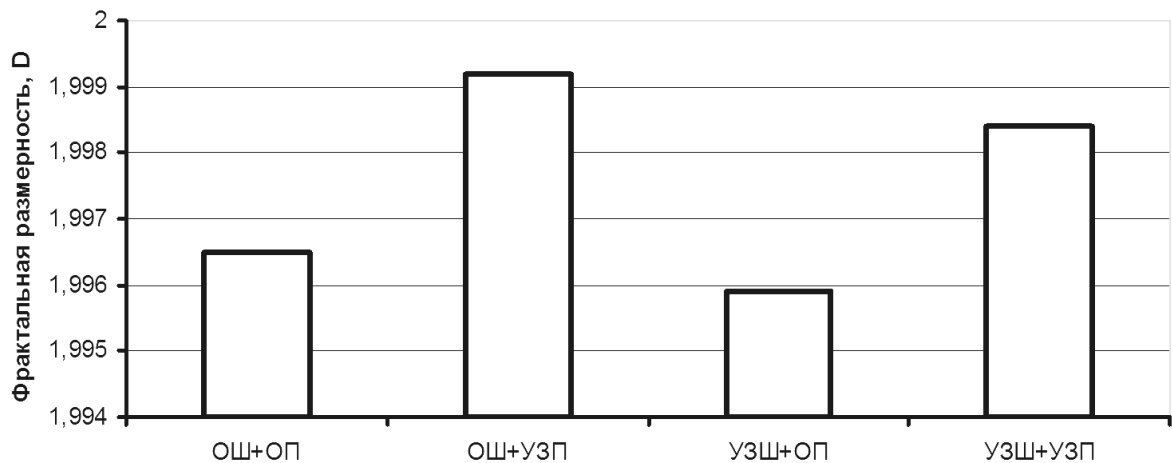
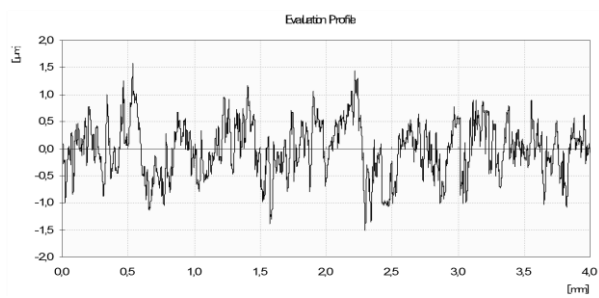


Рисунок 25. – Корреляционная связь величины фрактальной размерности D с параметром шероховатости Ra

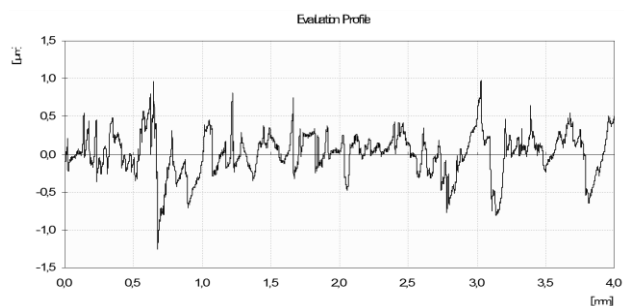
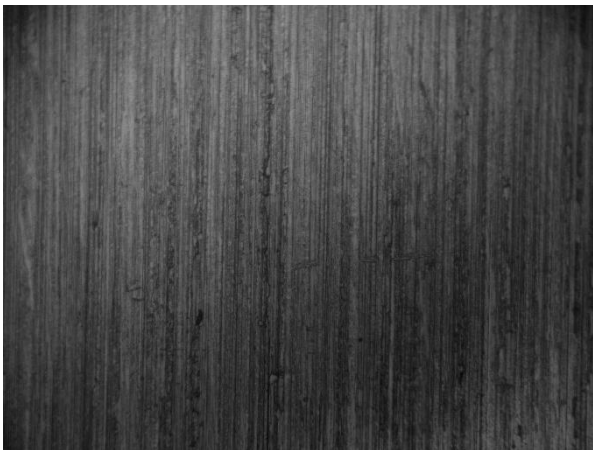
На рис. 26 приведены результаты расчета фрактальной размерности шлифованных образцов из стали ХВГ с шероховатостью $Ra=0,217; 0,401$ и $0,556$ мкм, прошедших обработку на плоскошлифовальном станке.

Статистическая обработка результатов измерений параметров шероховатости и результатов расчета фрактальной размерности позволила установить доверительные интервалы изменения параметра Ra и D для всех шлифованных образцов в следующем виде: $Ra = 0,406 \pm 0,225$ и $D = 1,4777 \pm 0,147$

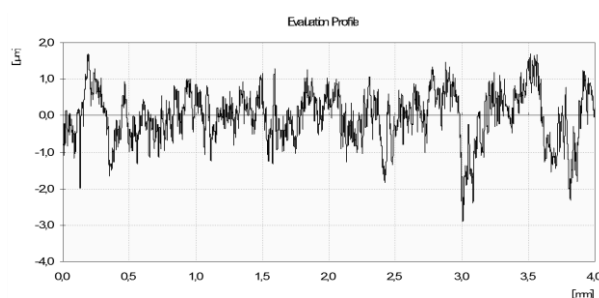
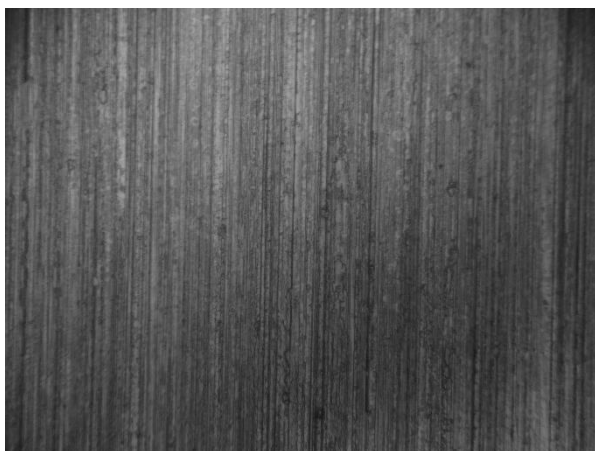
На рис. 27 приведены результаты расчета фрактальной размерности поверхностей после твердого точения с различными режимами обработки. А в таблицах 9 и 10 приведены результаты расчета фрактальной размерности поверхностей образцов после обычного и ультразвукового выглаживания. Наиболее интересные результаты получены при изучении влияния метода выглаживания на фрактальную размерность D микрорельефа поверхности образцов. Оказалось, что в отличие от очевидного тренда, зависимости $Ra(P)$, зависимости $D(P)$ и $D(Ra)$ связаны с методом выглаживания – с ультразвуковыми колебаниями или без них (рис. 28 и 29).



$Ra=0,406$; $D=1,4777$



$Ra=0,217$; $D=1,4087$



$Ra=0,556$; $D=1,4858$

Рисунок 26. – Результаты расчета фрактальной размерности шлифованных образцов

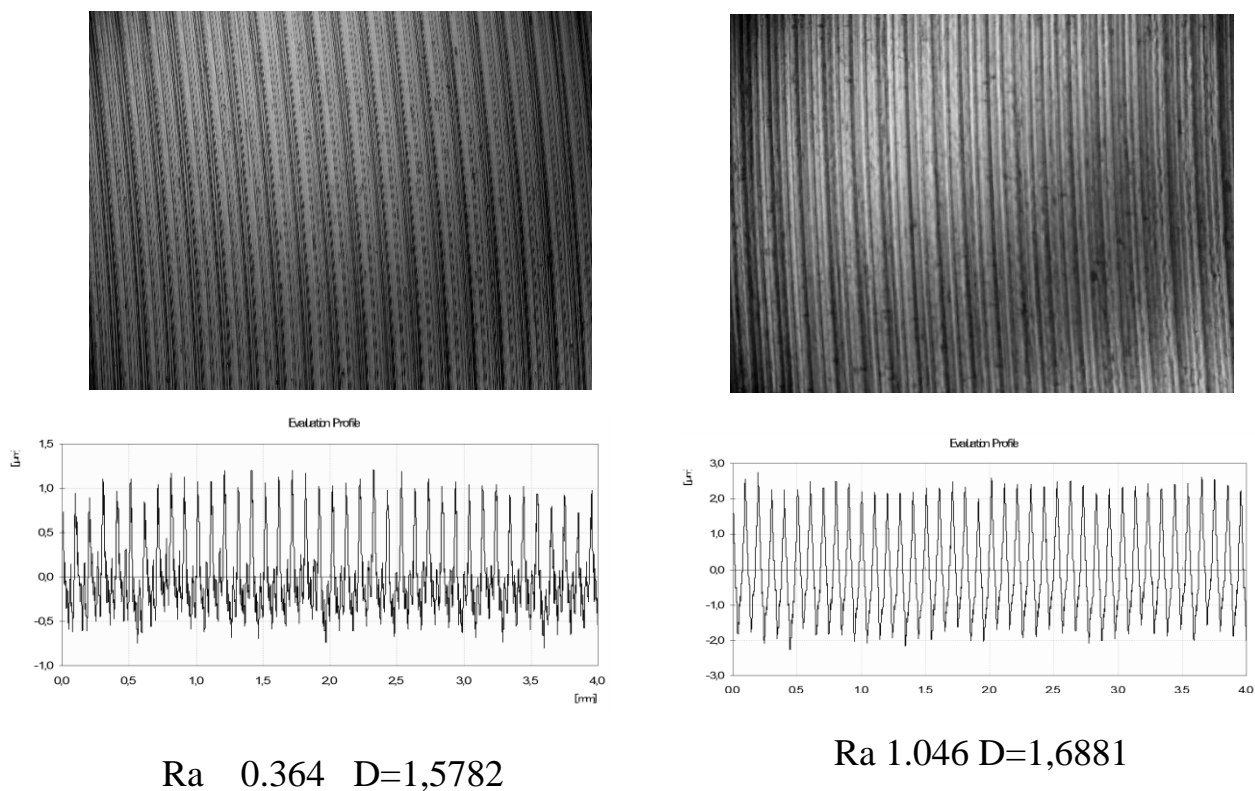
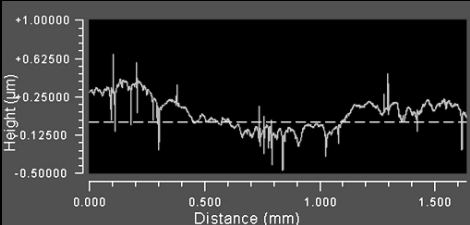
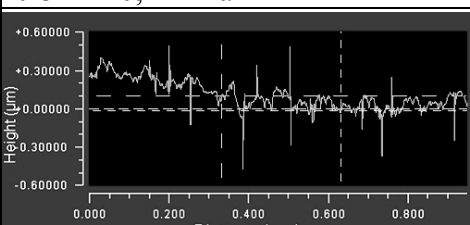
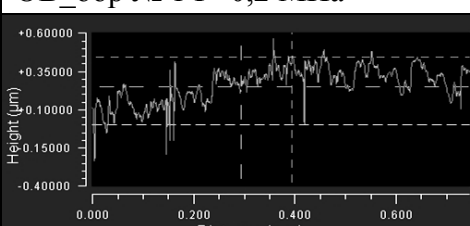
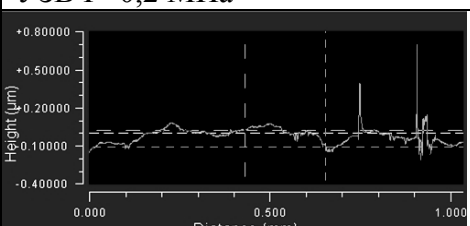
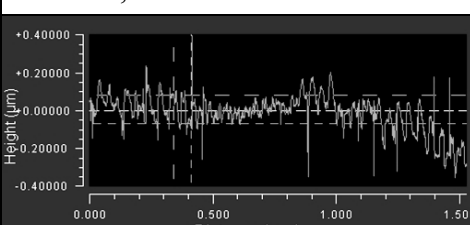
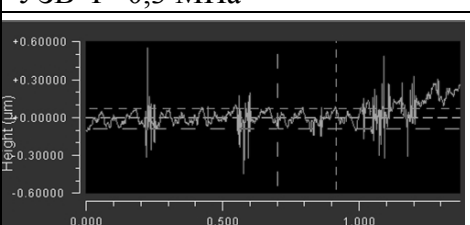


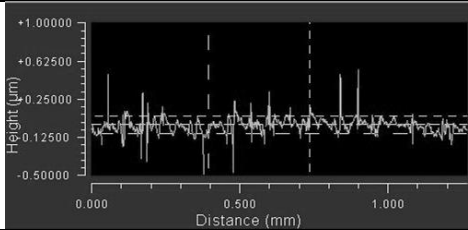
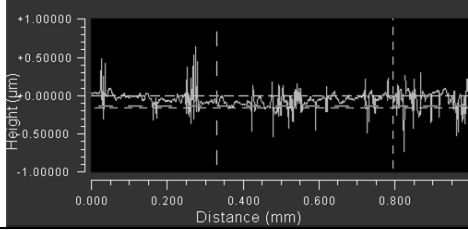
Рисунок 27. – Результаты расчета фрактальной размерности образцов после твердого точения

Таблица 9. – Влияние усилия выглаживания на показатели состояния обработанной поверхности

Метод обработки		Параметры профиля поверхности							
		Ra, µm	PV, µm	rms, µm	D	Ra, µm	PV, µm	rms, µm	D
Выглаживание		без УЗК				с УЗК			
Усилие, Н	100	0,128	1,136	0,154	1,51236	0,092	0,967	0,144	1,40888
	200	0,095	0,8	0,116	1,39848	0,078	0,913	0,094	1,33903
	250	0,069	1,036	0,092	1,41195	0,068	1,378	0,102	1,47034
	300	0,065	0,727	0,086	1,46797	0,055	1,053	0,075	1,48357

Таблица 10. – Показатели состояния поверхности образцов после механической обработки

Метод обработки поверхности, профилограмма	Параметр шероховатости Ra, мкм	Величина фрактальной размерности D
ОВ, p=0,1 МПа 	0,128	1,51236
УЗВ P=0,1 МПа 	0,092	1,40888
ОВ_обр № 1 P=0,2 МПа 	0,095	1,39848
УЗВ P=0,2 МПа 	0,078	1,33903
ОВ P=0,3 МПа 	0,065	1,46797
УЗВ P=0,3 МПа 	0,055	1,48357

ОВ P=0,25		
	0,069	1,41195
УЗВ P=0,25		
	0,068	1,47034

Из рисунков 28, 29 следует что при ультразвуковой упрочняющей обработки наблюдается пропорциональная зависимость шероховатости поверхности и ее фрактальной размерностью. Причем установлено, что между параметров Ra и фрактальной размерностью наблюдается обратно пропорциональная связь, а между усилием обработки и фрактальной размерностью прямопропорциональная корреляционная связь.

Также интересно отметить, что из полученных экспериментальных и расчетных данных при достаточно низких значениях шероховатости поверхности величина фрактальной размерности практически не изменяется и близка к топологической размерности, что говорит о более существенном сглаживании микронеровностей при ультразвуковой обработки. Изменение усилия внедрения инструмента при ультразвуковом выглаживании также не приводит к изменению фрактальной размерности обработанных поверхностей. Это может говорить о том, что при ультразвуковой обработке наиболее существенное значение на формирование шероховатости оказывает динамическая составляющая нагрузки.

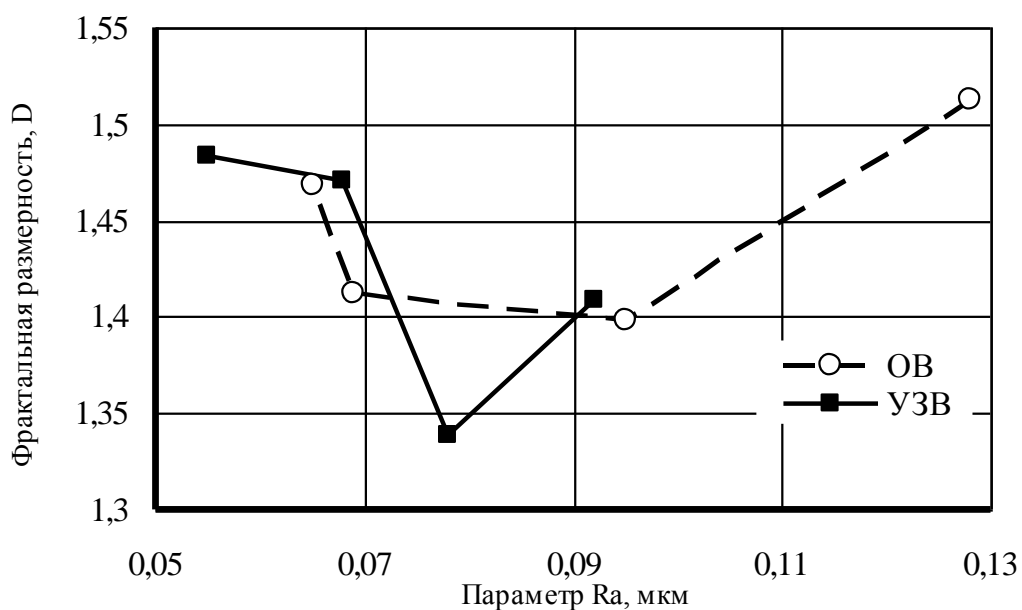


Рисунок 29. – Связь фрактальной размерности от параметра шероховатости Ra

4.3 Выводы по разделу

Выполненные экспериментальные исследования по оценке фрактальной размерности обработанных поверхностей позволяют сделать вывод о возможности оценки режущей способности шлифовального круга на основе аппарата фрактальной геометрии.

Таким образом, анализ численных результатов исследований поверхности образцов позволяет сделать вывод о существовании областей поверхности, обладающих фрактальными свойствами.

Заключение

В данной работе на основании проведенных нами экспериментов предложен метод оценки качества поверхности изделий с использованием различных фрактальных характеристик. К достоинствам метода можно отнести его универсальность и наглядность. Существование фрактальных областей обработанных поверхностей подтверждает возможности кластерного механизма формирования поверхности (на микро-, мезо-, макроуровне), являющегося следствием динамических неравноместных процессов. В связи с этим особенно интересным представляется разработка фрактально-синергетической модели процесса формирования рельефа поверхности (шероховатости), основанной на анализе заложенных в методах группового воздействия процессов самоорганизации. При этом шероховатость поверхности и поверхностный слой материала необходимо рассматривать как единую иерархическую фрактальную или мультифрактальную структуру. Такая модель позволит не только прогнозировать механизмы формирования шероховатости и физико-механических свойств поверхностного слоя, но и управлять ими.

Список используемой литературы

1. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В. Божокин, Д.А. Паршин. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» 2001. – 128 с.
2. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение. – 1981. – 244 с.
3. Иванова В. С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев // М.: Наука, 1994. – 383 с.
4. Костецкий Б.И., Качество поверхности и трение в машинах. «Техника»/ Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колесниченко. – Изд. «Техника». – 1969. – 216 с.
5. Киселев Е.С. Интенсификация процессов механической обработки рациональным использованием энергии ультразвукового поля. / Е.С. Киселев – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.
6. Киселев Е.С. Использование ультразвука при обработке заготовок шлифованием и выглаживанием / Е.С. Киселев, В.Н. Ковальногов, З.В. Степчева // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007–№8. – С. 43-53.
7. Кумабэ Д. Вибрационное резание / Д. Кумабэ. Перевод с яп. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.
8. Левин Б.М. Интенсификация процесса шлифования с применением ультразвуковой энергии / Б.М. Левин, В.И. Малышев, - Тольятти: Филиал ЦНИИ инф. и тех.-эк. исслед. 1990. –54 с.
9. Малышев В.И. Влияние ультразвуковой правки шлифовальных кругов на качество шлифованных поверхностей в условиях автоматизированного производства / В.И. Малышев, С.В. Мурашкин, А.Н. Попов// Вектор науки ТГУ – Тольятти ТГУ, 2010, №3 – с. 101-105.
10. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков – М.: Машиностроение, 1980 – 237с.

11. Нерубай М.С. Резание жаропрочных и титановых сплавов с помощью ультразвука./ М.С. Нерубай – Куйбышев: Куйбышевское книжное изд-во, 1964. – 246 с.
12. Никифоров А.Д. Высокие технологии размерной обработки в машиностроении/ А.Д. Никифоров и др. – М.: Высшая школа. – 2007. – 327с
13. Потапов А.А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур / А.А. Потапов, Булавкин В.В., Герман В.А., Вячеславова О.Ф. // Журнал технической физики. – Т.75, – №5. – 2005. – С. 28–45
14. Старосельский А.А. Долговечность трущихся деталей машин / А.А. Старосельский, Д.Н. Гаркунов, М: «Машиностроение». – 1967. – 266 с.
15. Суслов А.Г. Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. М.: Машиностроение. – 2002. – 684 с.
16. Селиванов А.С. Комплекс математических моделей дислокационно-энергетического состояния поверхностного слоя при ультразвуковом выглаживании / А.С. Селиванов, В.И. Малышев // Вектор науки ТГУ – Тольятти, 2011; №2 – С. 64 – 69.
17. Селиванов, А.С. Повышение эффективности ультразвукового выглаживания на станках с ЧПУ на основе управления дислокационно-энергетическим состоянием поверхностного слоя Автореферат дисс. канд. техн. наук. Ульяновск, УлГТУ, 2011 – 19 с.
18. Стандарт ISO 4287:1998. Геометрические характеристики изделий. Структура поверхности: профильный метод. Термины, определения и параметры структуры. М., 1999—252 с
19. Mandelbrot B.B. The fractal geometry of nature. N.Y.: Freeman, 1982.
20. Malkin S., Guo, C, Grinding Technology: Theory and Applications of Machining wite Abrasives, Second Edition. Industrial Press, New York, 2008. – p.372.
21. A. Brown, H.N. Hansen, X.J. Jiang, F. Blateyron, J. Berglund, N. Senin, T. Bartkowiak, B. Dixon, G. Le Goïc, Y. Quinsat, W.J. Stemp, M.K. Thompson, P.S.

- Ungar, E.H. Zahouani, Multiscale analyses and characterizations of surfacetopographies, CIRP Ann. 67 (2018) 839–862,
22. D.F. Dauw, C.A. Brown, J.P. van Griethuysen, J.F.L.M. Albert, Surface Topography Investigations by Fractal Analysis of Spark-Eroded, Electrically Conductive Ceramics, CIRP Ann. - Manuf. Technol. 39 (1990) 161–165
23. Chen, Y. Liu, P. Zhou, A comparative study of fractal dimension calculation methods for rough surface profiles, Chaos, Solitons & Fractals. 112 (2018) 24–30