

61:03-5/2359-7

Министерство образования Российской Федерации

Комсомольский – на – Амуре государственный технический университет

На правах рукописи  
УДК 621.91.01

МЕДВЕДЕВА ОЛЬГА ИВАНОВНА

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ПРИ РЕЗАНИИ НА ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Специальность      05. 03. 01 – Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РФ,  
академик РИА, доктор технических наук,  
профессор Ю.Г. Кабалдин



Комсомольск – на – Амуре

2002

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.....	10
1.1. Нормирование требований к неровностям на поверхности элемен- тов деталей.....	10
1.2. Влияние условий обработки на шероховатость обработанной по- верхности.....	15
1.2.1. Влияние геометрии процесса обработки на шероховатость по- верхности.....	17
1.2.2. Влияние пластических деформаций металла поверхностного слоя на шероховатость поверхности.....	21
1.2.3. Влияние СОТС на шероховатость поверхностного слоя при ре- зании.....	28
1.2.4. Влияние вибраций режущего инструмента, станка и заготовки на шероховатость поверхности.....	29
1.3. Методы диагностики и управления качеством поверхностного слоя.....	31
1.4. Выводы.....	42
ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ И АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ.....	43
2.1. Стенд для исследования шероховатости обработанной поверхно- сти.....	43
2.2. Аппаратное обеспечение результатов измерений.....	45
2.3. Алгоритмы оценки фрактальности, погрешности самоподобия и ин- формационной энтропии шероховатости.....	48
2.3.1. Требования к исходным данным.....	48
2.3.2. Алгоритмы оценки фрактальных размерностей.....	51

2.3.3. Фрактальная $D_0$ и информационная $D_1$ размерности.....	53
2.3.4. Корреляционная размерность $D_2$ .....	55
2.3.5. Свойства функции $D_q$ .....	56
2.3.6. Алгоритм вычисления фрактальной размерности шероховатости поверхности .....	57
2.3.7. Алгоритм расчета информационной энтропии.....	64
2.3.8. Алгоритм самоподобия временного ряда.....	72
2.4. Выводы.....	76
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ.....</b>	<b>79</b>
3.1. Исследование наростообразования при резании.....	79
3.2. Влияние условий обработки на шероховатость поверхности.....	92
3.2.1. Зависимость шероховатости от скорости резания.....	93
3.2.2. Зависимость шероховатости от подачи.....	102
3.2.3. Зависимость шероховатости от глубины резания.....	102
3.2.4. Влияние износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности.....	104
3.2.5. Зависимость шероховатости от упрочнения поверхностного слоя.....	106
3.3. Механизм формообразования при резании.....	109
3.4. Выводы.....	117
<b>ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ.....</b>	<b>118</b>
4.1. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от условий обработки.....	118
4.1.1. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от скорости резания.....	118

4.1.2. . Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от обрабатываемого материала.....	121
4.2. Информационная энтропия шероховатости обработанной поверхности .....	122
4.3. Зависимость фрактальной размерности и информационной энтропии шероховатости поверхности от износа инструмента.....	125
4.4. Оценка погрешности самоподобия шероховатости поверхностного слоя.....	125
4.5. Фрактальный подход к формированию и контактному взаимодействию обработанных поверхностей.....	130
4.6. Выводы.....	135
<b>ГЛАВА 5. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА.....</b>	<b>136</b>
5.1. Диагностика качества поверхности по частоте стружкообразования .....	136
5.2. Диагностика шероховатости обработанной поверхности по информационной энтропии .....	143
5.3. Разработка нейронно-сетевой модели управления шероховатостью поверхностного слоя.....	145
5.3.1. Имитационная модель процесса стружкообразования и образования микронеровностей на обработанной поверхности.....	145
5.3.2. Генетический алгоритм синтеза архитектуры нейронной сети .....	154
5.3.3. Нейронно-сетевая модель управления шероховатостью поверхности при резании.....	158
5.4. Выводы .....	160
6. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ .....	161
7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	163

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Актуальность работы.** Улучшение качества продукции характеризуется, прежде всего, повышением надежности и долговечности изделий, что эквивалентно экономии материальных и трудовых ресурсов. Поэтому качество, являясь важнейшим фактором повышения эффективности общественного производства, было и остается экономической категорией. К продукции машиностроения это имеет особое отношение, так как от ее качества, прежде всего, зависит качество многих других изделий промышленного производства.

Система управления качеством продукции включает комплекс мероприятий, направленных на достижение оптимального качества продукции на всех стадиях ее создания и потребления, систематически осуществляемых на предприятиях, в конструкторских, исследовательских и других организациях. Одним из важнейших факторов качества промышленной продукции является качество обработанных поверхностей элементов изделий, включающее в виде важнейшей составной части геометрические характеристики поверхности – шероховатость, волнистость, погрешности формы.

Для достижения качества изделий и управления им необходимо нормировать, технологически обеспечивать и контролировать неровности поверхности. Технологическое обеспечение заданных норм требует выявления формы и интенсивности связей неровностей поверхности с конкретными технологическими факторами, т.е. условиями формообразования.

Анализ исследований в области качества обработки, проведенный в последнее время, определил основную задачу, стоящую перед специалистами /50/:

- управление качеством обработанной поверхности с обеспечением определенных характеристик микронеровностей и с реализацией заданного

качества поверхностей при рациональной интенсивности (производительности) обработки.

Решить эту задачи можно только совместным применением теоретических исследований механизмов формообразования и экспериментальных исследований, используя новые подходы к изучению явлений, сопровождающих процесс резания металлов.

К числу фундаментальных подходов к исследованию физики и механики процесса резания следует отнести теорию самоорганизации (синергетику) и, прежде всего, ее методологию исследований – нелинейную динамику, а также подходы искусственного интеллекта – теорию фракталов и нейронных сетей, как информационных путей управления качеством поверхностного слоя.

Однако существующие критерии оценки качества обработанной поверхности ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $t_p$  и другие) в основном используются при разработке механизмов трения, а также контактного (упругого) взаимодействия твердых тел.

Поэтому задача повышения качества обработанной поверхности и изделий в целом обуславливает необходимость разработки новых критериев, прежде всего, шероховатости поверхности, которые позволяли бы диагностировать ее в процессе обработки. Это, в свою очередь, выдвигает новые требования к критериям оценки шероховатости обработанной поверхности, прежде всего, по информации о динамическом состоянии станка во времени.

Дело в том, что в процессе функционирования динамика системы резания, приводов оказывается сложной. Иначе говоря, в процессе обработки наблюдается переход устойчивой динамики станка к хаотической.

Замечательным свойством хаотических траекторий движения формообразующих органов станка (странных аттракторов) является их фрак-

тальность. В этой связи, фрактальная размерность аттракторов является критерием устойчивого функционирования станка, обеспечивающего изготовление деталей с заданным качеством.

Кроме того, в ряде работ показано, что поверхности многих твердых тел являются шероховатыми и обладают фрактальными свойствами. Имеются работы посвященные исследованию контакта и трения фрактальных шероховатых поверхностей /6/. Однако нет сведений о зависимости информационных характеристик процесса резания от условий механообработки.

Поэтому исследования взаимосвязи фрактальности шероховатости обработанной поверхности детали и условий механообработки, диагностики и управление на этой основе ее качеством является актуальной задачей в теории резания.

**Цель работы:** Разработка новых критериев оценки, диагностики и управления качеством обработанной поверхности при резании на основе искусственного интеллекта.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- предложен механизм формообразования поверхностного слоя детали при резании на основе вихревого механизма деформации в прирезцовых слоях обрабатываемого материала;

- установлена корреляционная связь частоты образования элементов стружки, времени релаксации пластических деформаций в зоне стружкообразования с шероховатостью обработанной поверхности;

- предложены новые информационные критерии оценки качества обработанной поверхности: фрактальная размерность –  $D$ , погрешность самоподобия –  $\Delta$ , информационная энтропия –  $H_1(S_u)$ ;

- установлены зависимости фрактальной размерности шероховатости обработанной поверхности, погрешности ее самоподобия, информационной энтропии от условий обработки.

**Практическая ценность работы** состоит в следующем:

1. Предложены критерии диагностирования шероховатости обработанной поверхности при резании.
2. Разработаны стенды программного и аппаратного обеспечения для диагностирования информационных параметров ( $D$ ,  $\Delta$ ,  $H_1$ ), характеризующих качество обработанной поверхности при резании.
3. Разработаны алгоритмы обработки информации ( $D$ ,  $\Delta$ ,  $H_1$ ), а также нейронносетевая модель управления шероховатостью обработанной поверхности при резании.

**Апробация и публикации работы.** Основные положения работы доложены на научных семинарах кафедры «Технология машиностроения» КнАГТУ в 2000-2002 годах, а также на международном симпозиуме «Нелинейная динамика и прикладная синергетика», г. Комсомольск-на-Амуре. По материалам диссертационной работы опубликовано 6 печатных работ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка, включающего 109 наименований, работа изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков.

**В первой главе** дан анализ процесса нормирования требований к шероховатости поверхности, изложены существующие подходы к исследованию влияния условий обработки на шероховатость обработанной поверхности, рассмотрены методы диагностики и управления шероховатостью обработанной поверхности.

**Во второй главе** изложены новые методики оценки шероховатости обработанной поверхности, рассмотрено аппаратное обеспечение резуль-

татов измерений, разработаны алгоритмы предложенных критериев оценки шероховатости поверхности.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований, отражающие новые представления о влиянии условий резания на наростообразование и высоту неровностей. На этой основе рассмотрен механизм формообразования при резании, учитывающий вихревой механизм деформации обрабатываемого материала в окрестности режущего лезвия.

**В четвертой главе** приведены зависимости предложенных информационных критериев оценки шероховатости поверхности от условий обработки, дана оценка погрешности самоподобия шероховатости обработанной поверхности.

**В пятой главе** рассмотрены метод диагностики шероховатости обработанной поверхности, а также нейронно-сетевая модель управления шероховатостью при резании.

Автор выражает свою глубокую признательность и благодарность:

- научному руководителю, Заслуженному деятелю науки и техники Российской Федерации, академику Российской инженерной академии, доктору технических наук, профессору Ю.Г. Кабалдину за моральную помощь и поддержку, обсуждение результатов исследований и высказанные замечания при проведении исследований, написании и представлении данной работы к защите;

- коллективу кафедры «Технология машиностроения» КнАГТУ, работнику ФГУП КНААПО им. Ю.А.Гагарина кандидату технических наук, доценту Биленко С.В., аспиранту кафедры «Технология машиностроения» Серому С.В. за помощь в организации и проведении экспериментальных исследований, обсуждении полученных результатов и замечания, способствовавшие улучшению содержания диссертации.

## **ГЛАВА 1. МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ И ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

Для достижения требуемого качества изделий необходимо нормировать, технологически обеспечивать, диагностировать неровности поверхности, а также управлять качеством обработанной поверхности. Поэтому проведен анализ процесса нормирования требований к шероховатости поверхности, изложены существующие подходы к исследованию влияния условий обработки на шероховатость обработанной поверхности, рассмотрены существующие методы диагностики и управления шероховатостью обработанной поверхности.

### **1.1. Нормирование требований к неровностям на поверхности элементов деталей**

В процессе выполнения любого способа обработки деталей, особенно со снятием металла режущим инструментом, невозможно получить идеально ровную поверхность. В результате вибраций, неровностей обрабатывающего инструмента, неоднородности материала заготовки, непостоянства скорости съема материала и подачи и т.д. на обрабатываемой поверхности остаются неровности.

Нормированием значений поверхностных неровностей стали заниматься сравнительно недавно. У нас в стране только в 1945 г. появился первый стандарт. Необходимость отдельного нормирования значений поверхностных неровностей в качестве одного из показателей для оценки геометрической точности вызвано тем, что эти неровности оказывают влияние на эксплуатационные свойства элементов деталей. Чем выше тре-

бование к точности элементов деталей, тем более жесткие требования должны предъявляться к значениям поверхностных неровностей.

Для развития системы нормирования требований к поверхностным неровностям характерно то, что одновременно с поиском новых параметров для оценки значений неровностей шли поиски новых и совершенствование существующих средств измерений. Как правило, новые нормируемые параметры появлялись с новыми средствами измерений.

Поверхностные неровности, которые появляются на элементах детали, в настоящее время называют шероховатостью поверхности.

**Шероховатостью** поверхности называется совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная на определенной (базовой) длине. Как видно из приведенного официального определения (ГОСТ 2789 – 73), в понятии о шероховатости содержится много неопределенности и несоответствий в свете обеспечения эксплуатационных свойств /62/.

Неопределенность в понятии о шероховатости присутствует во фразе «с относительно малыми шагами». При нормировании точности и при измерении нельзя употреблять термины «много», «мало», «высокая точность», «низкая точность» и т.д., если рядом нет указаний о числовом значении. Поэтому использование в определении «малые шаги» показывает, прежде всего, на **условность** самого понятия **шероховатости**.

Условность в приведенном определении понятия шероховатости заключается в том, что неровности поверхности выделяются на определенной длине, т.е. на участке между двумя точками, а не на поверхности, хотя именно по поверхности осуществляется контакт элементов детали. Эта условность определена, прежде всего, сложностями измерений шероховатости по поверхности.

Необходимость выделять поверхностные неровности на определенной длине, а не нормировать предельные значения неровностей, связана с тем, что при любом способе обработки появляется, как правило, большой спектр поверхностных неровностей, и отдельные случайные значения поверхностных неровностей не характеризуют эксплуатационные свойства этой поверхности.

Профили, характеризующие поверхностные неровности, представляют собой сложную периодическую структуру, из которой можно выделить большое количество всевозможных характеристик для оценки неровностей. Поскольку профиль содержит большой объем случайных значений неровности и только одно значение этих неровностей не может характеризовать эксплуатационные свойства, связанные с поверхностными неровностями, то для большинства нормируемых параметров принимаются некоторые усредненные значения неровностей. И не случайно, что в разных странах мира существует более 40 геометрических параметров для оценки шероховатости. Однако для практического нормирования в большинстве стран мира используют шесть параметров, характеризующих как высоту поверхностных неровностей, так и линейные (шаговые) показатели этих неровностей.

Количественно шероховатость поверхности оценивают следующими основными параметрами (одним или несколькими):

- средним арифметическим отклонением профиля  $R_a$ ,
- высотой неровностей профиля по 10 точкам  $R_z$ ,
- наибольшей высотой неровностей профиля  $R_{max}$ ,
- средним шагом неровностей  $S_m$ ,
- средним шагом неровностей по вершинам  $S$ ,
- относительной опорной длиной профиля  $t_p$ .

Требования к шероховатости поверхности деталей, как и выбор параметров для ее оценки, должны быть обоснованными и устанавливаться исходя из функционального назначения поверхностей деталей и их конструктивных особенностей. Расширенный комплекс параметров должен способствовать установлению обоснованных требований для поверхностей различного эксплуатационного назначения. Например, для трущихся поверхностей ответственных деталей устанавливают допустимые значения  $R_a$  (или  $R_z$ ),  $R_{max}$ ,  $t_p$ , а также направление неровностей; для поверхностей циклически нагруженных ответственных деталей -  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $S$ .

При выборе параметров  $R_a$  или  $R_z$  следует иметь в виду, что  $R_a$  дает более полную оценку шероховатости, так как для его определения измеряются и суммируются расстояния большого количества точек действительного профиля до его средней линии, тогда как при определении  $R_z$  измеряются расстояния только между пятью вершинами и впадинами неровностей.

Форма неровностей влияет на параметр  $R_a$ . Однако влияние формы неровностей на эксплуатационные показатели качества детали величиной  $R_a$  оценить нельзя, так как при различных формах неровностей значения  $R_a$  могут быть одинаковыми. О форме неровностей можно косвенно судить по параметрам  $S_m$ ,  $S$ ,  $t_p$ .

В работах /96, 97/ установлена следующая корреляционная связь между параметрами шероховатости  $R_a$ ,  $R_z$  и  $R_{max}$  при обработке наружных поверхностей вращения точением:

$$R_{max} = 5,0 R_a; \quad R_z = 4,0 R_a.$$

Однако введение в действие ГОСТ 2789-73 не решило проблему технологического обеспечения и улучшения эксплуатационных свойств деталей машин, так как их несущая способность и контактное взаимодействие зависят от состояния поверхностного слоя в целом (макроотклоне-

ния, волнистости, шероховатости, физико-химических свойств), а не только от параметров шероховатости, т.е. требуется комплексный подход к изучению состояния поверхностного слоя. Выбор системы параметров поверхностного слоя деталей машин одновременно предопределяется возможностью их технологического и метрологического обеспечения.

Таким образом, технологическое обеспечение и повышение качества выпускаемых машин и приборов могут быть успешно осуществлены только при комплексном выборе, назначении, технологическом и метрологическом обеспечении системы параметров состояния поверхностного слоя деталей, характеризующих их эксплуатационные свойства.

Шероховатость поверхности после механической обработки – это геометрический след режущего инструмента, искаженный в результате пластической и упругой деформации и сопутствующей процессу резания вибрации технологической системы станок – приспособление – инструмент – деталь (СПИД).

Причинами, обуславливающими видоизменение и искажение (трансформацию) основного геометрического профиля, являются также копирование микронеровностей рабочих кромок резца и образование зубцов нароста, приставших к поверхности детали, упругое поднятие материала детали после прохода режущего инструмента и другие технологические факторы, определяющие условия механической обработки.

Геометрия неровностей тесно связана с физико-механическими процессами разрушения металла при обработке резанием. Так, шероховатость поверхности при обработке хрупких металлов представляется в виде треугольных углублений, отвечающих форме вырванных зерен; в вязких металлах при больших скоростях резания сильно деформированные неровности имеют форму чешуек /8/.

Таким образом, можно утверждать, что применяемый способ нормирования требований к поверхностным неровностям еще не является в полной мере совершенным, поскольку просто геометрический подход не полностью выявляет эксплуатационные свойства поверхности. Идет поиск показателей и средств измерения для оценки шероховатости по ее влиянию на эксплуатационные свойства. Вполне возможно, что в дальнейшем будут введены различные параметры в зависимости от выявляемых эксплуатационных свойств.

## **1.2. Влияние условий обработки на шероховатость обработанной поверхности**

Шероховатость поверхности детали, обработанной резанием, зависит от большого количества причин, связанных с условиями ее изготовления. В частности, высота и форма неровностей, а также характер расположения и направление обработочных рисок зависят от принятого метода и режима обработки, от условий охлаждения и смазки инструмента, от химического состава и микроструктуры обрабатываемого материала, от конструкции, геометрии и стойкости режущего инструмента, от типа и состояния используемого оборудования, вспомогательного инструмента и приспособлений и т.д.

Все многообразие причин, определяющих шероховатость обработанной поверхности, можно объединить в три основные группы:

- причины, связанные с геометрией процесса обработки;
- причины, связанные с пластической деформацией обрабатываемого материала;
- причины, связанные с возникновением вибраций режущего инструмента.

В этой связи суммарное значение  $R_z$  при резании /58/ определяется по формуле:

$$R_z = \Delta R_z^H + \Delta R_z^{ПД} + \Delta R_z^B, \quad (1.1)$$

где  $\Delta R_z^H$  – высота несрезанного металла;  $\Delta R_z^{ПД}$  – прирост высоты неровностей из-за пластических деформаций;  $\Delta R_z^B$  – прирост высоты неровностей из-за вибраций.

При рассмотрении геометрических причин образования неровностей процесс их возникновения принято трактовать как копирование на обрабатываемой поверхности траектории движения режущих лезвий определенной формы. Поэтому с геометрической точки зрения величина, форма и взаимное расположение неровностей определяются формой режущих лезвий и теми элементами режима резания, которые влияют на изменение траектории движения режущих лезвий относительно обрабатываемой поверхности.

Пластические деформации обрабатываемого материала и вибрации искажают геометрически правильную форму и закономерное распределение неровностей поверхности, в значительной степени увеличивая их высоту.

В различных условиях обработки преобладающее влияние на формирование шероховатости поверхности оказывает одна из трех указанных групп причин, что и определяет в конечном случае характер и величину шероховатости. Однако в отдельных случаях возможно одновременное влияние на процесс образования шероховатости всех указанных выше причин. Шероховатость обработанной поверхности в подобных случаях приобретает сложный характер, лишенный четко выраженных закономерностей.

### 1.2.1. Влияние геометрии процесса обработки на шероховатость поверхности

При обработке деталей резцом за один оборот заготовки резец перемещается на величину подачи  $s_1$  мм/об и переходит из положения 2 в положение 1 (рисунок 1.1, а). При этом на обработанной поверхности остается некоторая часть металла, не снятая резцом и образующая остаточный гребешок  $m$ . Совершенно очевидно, что величина и форма неровностей поверхности, состоящих из остаточных гребешков, определяется чисто геометрически значением подачи  $s_1$  и формой режущего инструмента.

Например, при уменьшении подачи до значения  $s_2$  высота неровностей  $R_z$  уменьшается до значения  $R_z''$  (рисунок 1.1, б).

Таким образом, при увеличении подачи шероховатость обработанной поверхности повышается, глубина наклепа возрастает. Увеличение подачи способствует также увеличению остаточных напряжений и уменьшению износостойкости и коррозионной стойкости. Усталостная прочность в этом случае повышается.

Изменение значений главных углов в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$  меняет не только высоту, но и форму неровностей поверхности (рисунок 1.1, в). При увеличении главного угла в плане  $\varphi$  от  $30^\circ$  до  $60^\circ$  шероховатость обработанной поверхности возрастает, при черновой обработке значительно, а при отделочной – до  $R_a = 1,6 \div 3,2$  мкм. Уменьшение главного угла  $\varphi$  в плане от  $90^\circ$  до  $45^\circ$  вызывает уменьшение глубины наклепа и снижение усталостной прочности. При увеличении вспомогательного угла в плане  $\varphi_1$  шероховатость поверхности увеличивается, при черновой обработке до  $R_a \approx 16$  мкм, а при отделочной – до  $R_a \approx 1,6 \div 3,2$  мкм.

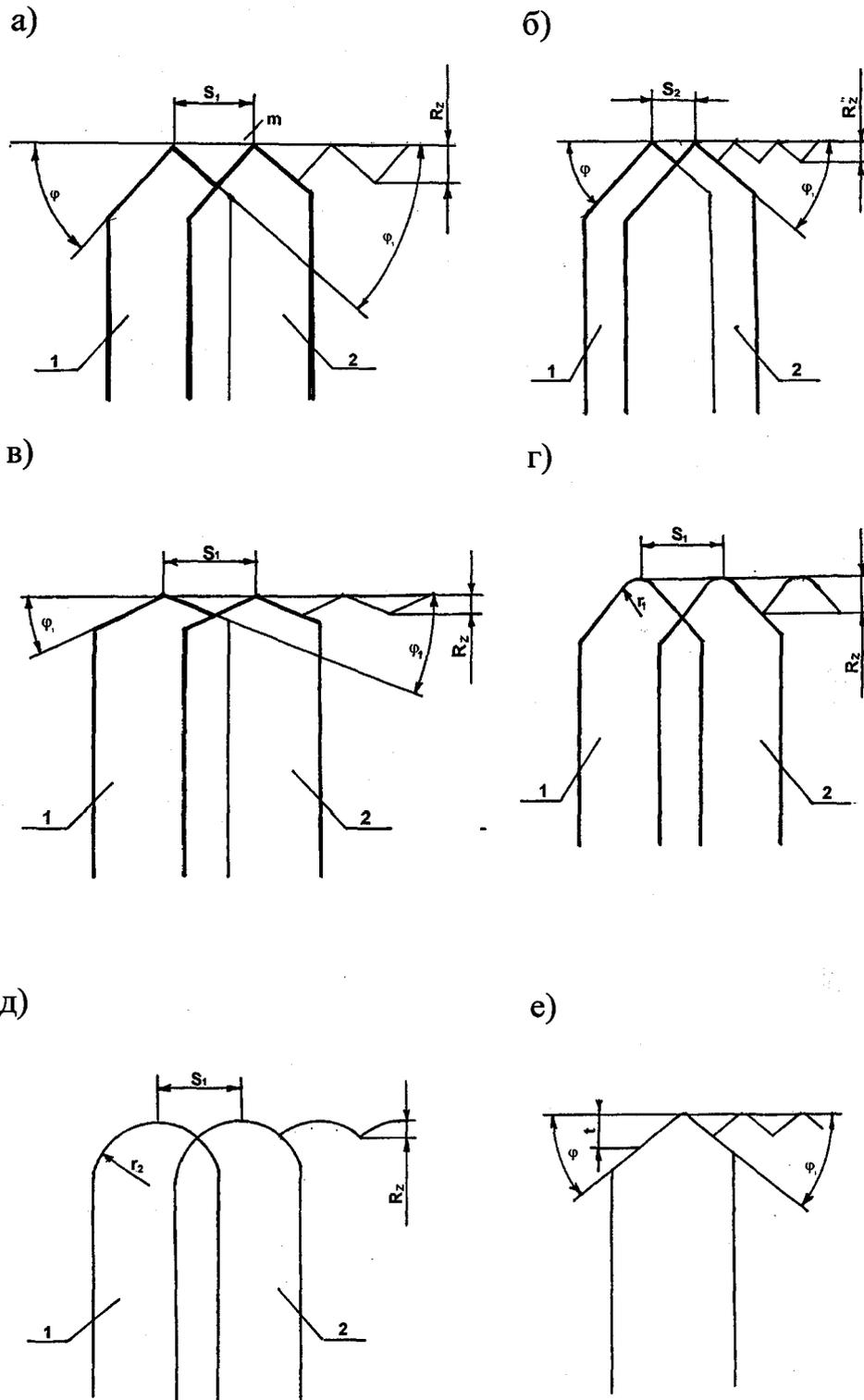


Рисунок 1.1. Влияние подачи и углов в плане резца на шероховатость поверхности

При использовании резцов с закругленной вершиной достаточно большого радиуса  $r_1$  форма неровностей соответственно меняется и становится также закругленной (рисунок 1.1, г).

При этом увеличение радиуса закругления вершины резца до значения  $r_2$  приводит к уменьшению высоты шероховатости  $R_z$  (рисунок 1.1, д). Таким образом, увеличение радиуса  $r$  закругления резца в пределах от 0,5 до 4 мм снижает шероховатость обработанной поверхности; износостойкость повышается в пределах оптимальной шероховатости, усталостная прочность увеличивается.

Исходя из приведенных соображений геометрического характера, профессор В.Л. Чебышев предложил определять высоту неровностей при обработке резанием в зависимости от подачи и радиуса закругления резца по следующей формуле:

$$R_z = s^2 / 8r, \quad (1.2)$$

где  $R_z$  – высота неровностей при точении;

$s$  – подача в мм/об;

$r$  – радиус закругления вершины резца в мм.

При точении резцами с небольшими радиусами закругления с использованием больших подач, когда в процессе образования неровностей участвует не только криволинейная часть режущей кромки резца, образованная радиусом закругления  $r$ , но и прямолинейный участок режущего лезвия  $t$  (рисунок 1.1, е), формула Чебышева видоизменяется, включая в себя значения главных углов в плане  $\varphi$  и  $\varphi_1$  [22].

При изготовлении режущего инструмента и, особенно, при его затуплении на режущем лезвии инструмента образуются неровности и зазубрины, определенным образом увеличивающие шероховатость обрабатываемой поверхности. В отдельных случаях полного копирования профиля зазубрин лезвия на обрабатываемой поверхности может и не произойти,

так как пластически деформированный металл стружки и обрабатываемой поверхности иногда затекает в зазубрины режущей кромки и, частично затормаживаясь в их полости, делает их как бы более мелкими. В результате этого рост высоты шероховатости обработанной поверхности в некоторых случаях отстает от увеличения глубины зазубрин режущего лезвия /64/. Однако и в этих случаях влияние зазубрин лезвия на шероховатость обрабатываемой поверхности может быть значительным.

По имеющимся практическим данным, при затуплении режущего инструмента и появлении на нем зазубрин шероховатость обработанной поверхности возрастает при точении на 50 – 60 %. Следует заметить, что указанное увеличение шероховатости обрабатываемой поверхности, происходящее при затуплении режущего инструмента, связано не только с геометрическим влиянием зазубрин, возникающих на режущем лезвии, но вызывается также увеличением радиуса при вершине, происходящим при затуплении инструмента. Увеличение радиуса при вершине резца повышает степень пластической деформации металла поверхностного слоя, что приводит к росту шероховатости поверхности.

Для устранения влияния зазубрин и притупления режущего лезвия рекомендуется тщательная (желательно алмазная) доводка инструментов и своевременная их переточка.

Приведенные данные дают основание для следующих выводов:

1. Увеличение подачи при точении влечет за собой значительный рост высоты неровностей.
2. При увеличении главного и вспомогательного углов резца в плане ( $\varphi$  и  $\varphi_1$ ), т.е. при работе остроконечными резцами, высота неровностей возрастает.
3. Увеличение радиуса при вершине резца снижает высоту шероховатости поверхности.

4. Для устранения влияния неровностей режущего лезвия инструмента на шероховатость обработанной поверхности необходимо проводить заточку и доводку инструмента таким образом, чтобы лезвие инструмента было на два-три класса выше требуемого класса шероховатости обрабатываемой поверхности деталей. Наряду с уменьшением шероховатости обрабатываемой поверхности подобная доводка заметно повышает стойкость режущего инструмента, а следовательно, и экономичность его использования.

#### 1.2.2. Влияние пластических деформаций металла поверхностного слоя на шероховатость поверхности

Пластические деформации обладают большим удельным весом в процессе образования шероховатости.

При обработке резанием пластичных материалов поверхностный слой детали сильно деформируется, теряет свою мелкокристаллическую структуру и приобретает волокнистое специфическое строение, обладающее иными физическими свойствами. При этом значительно изменяются геометрическая форма и величина неровностей обработанной поверхности (обычно шероховатость при этом увеличивается). То есть, более вязкие и пластичные материалы (например, малоуглеродистая сталь) и структуры, склонные к пластическим деформациям, дают при их обработке резанием грубые и шероховатые поверхности.

При обработке хрупких металлов наблюдается вырывание отдельных кристаллических зерен, что также ведет к увеличению размеров и изменению формы неровностей. Исследования в этой области проводились многими учеными /13, 16, 17, 18, 22, 37, 48, 75, 93, 94, 98, 100, 104, 109/.

Величина шероховатости обработанной поверхности уменьшается при переходе от структуры феррито-перлита к трооститу и трооститу-

мартенситу. Феррит, являющийся мягкой, вязкой и легко деформирующейся составляющей структуры стали, при обработке резанием имеет склонность к образованию неровностей поверхности. С точки зрения получения поверхности с минимальной шероховатостью оказываются чрезвычайно неблагоприятными структуры с неоднородной величиной зерен, в частности структура так называемого глобулярного перлита, состоящая из круглых зерен цементита, рассеянных по основной массе феррита.

Значительно меньшую шероховатость дают стали после нормализации и отпуска, обладающие однородной и мелкозернистой структурой.

Таким образом, для получения при механической обработке возможно меньших шероховатостей рекомендуется предварительная нормализация углеродистой стали при температуре 850 – 870 °С или (в случае необходимости облегчить условия резания и повысить стойкость режущего инструмента) отжиг при 900° С в течение 5 часов.

Исследованиями А.И. Исаева /22/ установлено, что с увеличением *твердости обрабатываемого материала* высота неровностей снижается, уменьшается объем металла, подвергаемый пластической деформации, а усталостная прочность повышается. При этом одновременно уменьшается влияние изменения скорости резания на высоту неровностей и при твердости 4905 Мн/м<sup>2</sup> (НВ 500 кг/мм<sup>2</sup>) влияние скорости практически отсутствует.

Этими исследованиями также установлено, что влияние скорости и твердости на высоту шероховатости углеродистых сталей различной твердости заметно проявляется лишь в зоне сравнительно низких скоростей резания. При превышении скорости резания 140 м/мин влияние твердости на высоту шероховатости заметно ослабевает. Это объясняется тем, что уже при скорости резания 140 м/мин и выше температура обрабатываемого материала достигает 780 – 840° С. При такой температуре механические

свойства сталей различной начальной твердости в значительной степени выравниваются, в результате чего высота шероховатости стабилизируется и практически не зависит от изменения скорости резания. На основании этих исследований для уменьшения шероховатости поверхности рекомендуется предварительная термообработка конструкционных сталей, повышающая их твердость.

Снижение вязкости обрабатываемого материала за счет *наклепа* поверхностного слоя также способствует уменьшению размеров неровностей обработанной поверхности.

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на процесс образования шероховатостей при обработке резанием, является *скорость резания*.

При малых скоростях резания углеродистых сталей (сталь 30, сталь 40, сталь 50) порядка  $V = 1$  м/мин развивается сравнительно небольшая температура, образуется элементная стружка /64, 65/. Отделение стружки происходит легко, без заметных деформаций верхнего слоя обрабатываемой поверхности. Неровности на обрабатываемой поверхности незначительны.

При увеличении скорости резания до 20 – 40 м/мин в процессе образования стружки выделяется большое количество теплоты, которая вместе с возросшим давлением резания вызывает пластическое течение отделяемого металла вдоль передней и задней поверхностей резца. В некоторый момент под действием больших усилий, прижимающих слои металла к передней поверхности резца, и высоких температур, увеличивающих коэффициент трения, слои металла привариваются к передней (и отчасти задней) поверхности, образуя так называемый нарост.

При скоростях резания 20 – 40 м/мин величина нароста оказывается наибольшей, а сам нарост наиболее устойчивым.

При дальнейшем повышении скорости резания продолжается увеличение количества тепла, выделяемого в процессе стружкообразования. При этом нарост нагревается быстрее остальной части зоны деформации и разупрочняется. В результате этого силы сцепления отдельных частиц нароста уже не могут оказать достаточного сопротивления силам трения стекающей стружки, и частицы металла застойной зоны уносятся вместе со стружкой. Величина нароста сокращается, и в интервале скоростей 30 – 60 м/мин нарост исчезает. При последующем повышении скорости резания наростов на резце не образуется.

Шероховатость обработанной поверхности в значительной степени связана с процессами образования стружки и в первую очередь с явлениями нароста. В зоне малых скоростей, при которых нарост не образуется ( $V = 1$  м/мин), размеры неровностей обработанной поверхности незначительны. При увеличении скорости размеры неровностей поверхности возрастают, достигая при 20 – 40 м/мин своего наивысшего значения, многократно превосходящего расчетную величину.

Дальнейшее повышение скорости резания уменьшает величину нароста и понижает высоту шероховатости обработанной поверхности.

В зоне скоростей, при которых нарост не образуется (выше 60 – 70 м/мин), шероховатость поверхности оказывается наименьшей. В этом случае дальнейшее увеличение скорости резания только весьма незначительно способствует уменьшению высоты шероховатостей поверхности. Сопоставление графика изменения величины нароста на резце при изменении скорости резания с графиком изменения усадки стружки, а также с графиком изменения высоты неровностей при увеличении скорости резания (рисунок 1.2) показывает тесную связь процессов образования шероховатости обрабатываемой поверхности и нароста. Поэтому исследование на-

ростообразования при резании и влияние нароста на параметры обработанной поверхности подробно рассматриваются в данной работе в главе 3.

При высоких скоростях резания глубина пластически деформированного поверхностного слоя незначительна и размеры шероховатости поверхности приближаются к расчетным значениям.

В случае обработки хрупких материалов (например, чугуна) наряду со срезом отдельных частиц металла происходят их сдвиг и беспорядочное хрупкое откалывание от основной массы металла, увеличивающие шероховатость поверхности. Повышение скорости резания уменьшает откалывание частиц, и обрабатываемая поверхность становится более гладкой.

При чистовой обработке металлов, когда состояние и точность обработанной поверхности имеют решающее значение, совершенно естественно стремление вести обработку в зоне скоростей, при которых нарост на инструменте не образуется, а шероховатость поверхности получается наименьшей.

Таковыми зонами для углеродистых сталей, как это отмечалось выше, являются скорости до 1 м/мин и превышающие 60 – 70 м/мин.

А.И. Исаев /22/ ввел понятие граничной скорости резания  $V_{\text{гран}}$ , начиная с которой высота неровностей перестает быть зависимой от скорости резания и определяется геометрическими факторами. Граничной скоростью резания, начиная с которой наблюдается стабилизация высоты неровностей и усадки стружки, является скорость 75 м/мин.

Другим фактором режима резания, имеющим решающее значение для образования шероховатости, является *подача*. Влияние подачи на размеры шероховатости связано не только с рассмотренными выше геометрическими причинами, но также в значительной степени обусловлено пластическими и упругими деформациями в поверхностном слое.



1 – нарост на резце; 2 – усадка стружки; 3 – высота шероховатости

Рисунок 1.2. Влияние скорости резания при точении на шероховатость поверхности

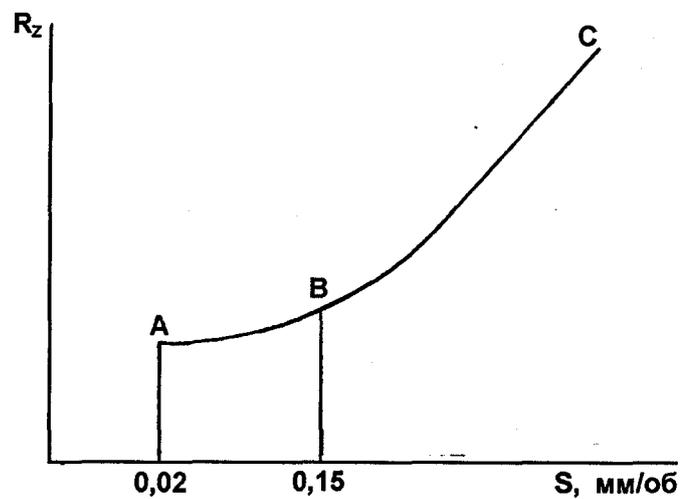


Рисунок 1.3. Влияние подачи при точении стали на шероховатость поверхности

На рисунке 1.3 приведен график зависимости шероховатости от подачи при точении сталей, построенный профессором П.Е. Дьяченко /13/. Как следует из этого графика, при работе с малыми подачами в интервале 0,02 – 0,15 мм/об (участок АВ), характерными для отделочного точения, изменение величины подачи мало отражается на высоте шероховатости.

Неровности поверхности в этом случае образуются не столько под влиянием геометрии процесса, сколько под влиянием пластических и упругих деформаций, скорости резания и радиуса округления режущего лезвия резца.

При снижении подачи меньше  $s = 0,02$  мм/об величина шероховатости не только не уменьшается, но даже увеличивается. В связи с этим наиболее целесообразной величиной подачи при отделочном точении углеродистых конструкционных сталей, обеспечивающей наименьшую величину шероховатостей обработанной поверхности при получении высокой производительности, следует признать подачу  $s = 0,05 - 0,12$  мм/об.

При переходе в область крупных подач ( $s \geq 0,15$  мм/об) на образование шероховатости влияют пластические и упругие деформации поверхностного слоя, а также и чисто геометрические причины. Величина неровностей резко возрастает с увеличением подачи и кривая шероховатости круто поднимается вверх (участок ВС).

Таким образом, даже при минимальной подаче нельзя полностью устранить шероховатость обработанной поверхности, которая в этом случае в значительной мере определяется наименьшей толщиной срезаемого слоя и пластическими деформациями обрабатываемого материала.

**Влияние глубины резания** на величину шероховатости, как установлено наблюдениями многочисленных исследователей /13, 22, 48, 75, 93, 94, 100, 104 и др./, совершенно ничтожно и практически может не приниматься во внимание. При уменьшении глубины резания до 0,02 – 0,03 мм

вследствие наличия на режущей кромке резца некоторого скругления нормальное резание прекращается, и резец, отжимаясь от изделия, начинает скользить по обрабатываемой поверхности, периодически врезаясь в нее и вырывая отдельные участки. Поэтому глубину резания при работе обычными резцами не следует брать слишком малой.

При работе с глубиной резания меньшей, чем подача, глубина оказывает геометрическое влияние на высоту шероховатости. В этом случае уменьшение глубины резания снижает высоту шероховатости.

### 1.2.3. Влияние СОТС на шероховатость поверхностного слоя при резании

Применение смазывающе-охлаждающих технологических систем (СОТС), уменьшающих трение и облегчающих процесс стружкообразования, способствует снижению высоты неровностей поверхности, снижает затраты энергии, а также препятствует образованию нароста у режущей кромки инструмента.

Влияние СОТС на шероховатость обработанной поверхности [49, 59, 81, 100, 104] проявляется через деформации, сопровождающие процесс стружкообразования, и контактное взаимодействие задней поверхности инструмента с изделием. Исследования показывают, что применение смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) ведет к стабилизации образующегося микропрофиля. При работе острым инструментом между величиной отклонения фактической высоты микронеровностей от расчетной (деформационная составляющая) и отношением длины пластического контакта к толщине среза существует единая зависимость, которая соблюдается в достаточно широком диапазоне скоростей и подач и при применении различных СОЖ.

СОЖ должны обладать высокими охлаждающими, смазывающими, антикоррозионными свойствами и быть безвредными для рабочего. Все применяемые жидкости можно разбить на две основные группы – охлаждающие и смазочные. К первой группе относят водные растворы и эмульсии, обладающие большой теплоемкостью и теплопроводностью. Широко распространены водные эмульсии, в состав которых входят 2–20 % масла и 0,3–2 % мыла и поверхностно-активные вещества. Водные эмульсии применяют при обдирочных работах, когда к шероховатости поверхности не предъявляют высоких требований.

Ко второй группе относят СОЖ, обладающие высокой маслянистостью: минеральные масла, керосин, а также растворы в масле или керосине поверхностно-активных веществ. Жидкости этой группы применяют при чистовых и отделочных работах.

#### 1.2.4. Влияние вибраций режущего инструмента, станка и заготовки на шероховатость поверхности

Вибрации лезвия режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности являются дополнительным источником увеличения шероховатости обработанной поверхности. Как известно, в процессе резания возникают вынужденные колебания системы станок – заготовка – инструмент, вызываемые действием внешних сил, и автоколебания системы, появление которых связано с периодическим упрочнением (наклепом) срезаемого металла и изменением условий трения при резании [14, 28, 51, 66]. Вынужденные колебания системы обуславливаются дефектами отдельных механизмов станка, являющимися причиной неравномерности его движений (неточности зубчатых передач, плохая балансировка вращающихся частей, неудовлетворительная сшивка ремня, большие зазоры в подшипниках и т.д.).

Большое влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает состояние станка. Новые, хорошо отрегулированные станки, установленные на массивных фундаментах или на виброопорах, хорошо изолированные от вибраций другого оборудования, обеспечивают минимальную шероховатость.

Вследствие того, что отдельные части станка при его работе могут вибрировать с различной частотой, поверхность обрабатываемого изделия покрывается несколькими системами продольных и поперечных волн разного шага – от нескольких миллиметров до десятков миллиметров.

При наличии вибраций в системе станок – приспособление – инструмент – деталь величина волнистости и продольной шероховатости поверхности возрастает с увеличением усилий резания, а следовательно, и с повышением глубины резания и скорости вращения изделия.

Известно, что одним из ответственных этапов разработки технологического процесса является расчет оптимальных режимов обработки, который заключается в определении значений скорости, подачи и глубины резания, обеспечивающих требуемую точность, шероховатость и устойчивую работу технологической системы при наименьшей себестоимости обработки /5, 7, 97, 100, 104, 109 и др./, т.е.  $R_z = f(V, S, t)$ .

Для технологического обеспечения оптимальной шероховатости поверхности из условий эксплуатации изделия важно знать взаимосвязь между критериями шероховатости поверхности и технологическими факторами (методами и режимами резания, геометрии, износа и материала режущего инструмента, смазочно-охлаждающих сред, жесткости и виброустойчивости технологической системы и др.), а также между физико-механическими свойствами обрабатываемого материала.

В настоящее время имеются теоретические и эмпирические формулы, устанавливающие взаимосвязь того или иного критерия шероховатости

поверхности с основными технологическими факторами. Так, например, С.П. Семенов /95/ дает общую формулу для оценки шероховатости поверхности при скоростном и тонком точении и фрезеровании:

$$R_a = C_t C_s C_v C_r C_\phi C_{HB} t^m s^n \phi^x \phi_1^y \alpha^\mu / v^p r^q HB^w, \quad (1.3)$$

где  $R_a, t, s, r$  – в мкм;  $v$  – в м/мин;  $\phi, \phi_1, \alpha$  – в градусах;  $HB$  – в н/мм<sup>2</sup>;  $m, n, p, q$  и т.д. – показатели степени при соответствующих параметрах, которые характеризуются константами  $C_t, C_s, C_v$  и т.д.

В частности, для тонкого растачивания резцами из твердых сплавов Т15К6 и Т30К4 заготовок из сталей формула (1.3) имеет следующий вид:

$$R_a = \frac{t^{0,16} \cdot S^{0,45} \cdot \phi^{0,82}}{V^{0,49} \cdot r^{0,25}}. \quad (1.4)$$

Таким образом, основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности при обработке резанием металлическим инструментом, являются – скорость, подача и глубина резания, а также радиус закругления вершины резца.

Приближенные эмпирические зависимости значительно выигрывают в простоте по сравнению с аналогичными точными математическими моделями. Однако удовлетворительная точность эмпирических зависимостей достигается лишь в том случае, если закон аппроксимации известен заранее или был «угадан» путем перебора различных комбинаций алгебраических функций. К сожалению, очень часто закон заранее неизвестен или слишком сложен для синтеза в виде набора простейших функций.

### 1.3. Методы диагностики и управления качеством поверхностного слоя

В последние годы, из-за простоты реализации, широкое применение получили методы диагностики выходных параметров резания, основанные на целенаправленном синтезе приближенных эмпирических моделей про-

цесса механической обработки, устанавливающих взаимосвязь того или иного выходного критерия процесса с основными технологическими факторами.

Повышение эксплуатационной надежности и точности современного оборудования металлообработки достигается включением в его состав измерительно-информационной подсистемы, с помощью которой решаются задачи диагностики оборудования, в том числе, диагностики режущего инструмента /84/. В данной работе параметром, характеризующим геометрическую точность изделий и пригодным для определения состояния режущего инструмента, выбрана шероховатость обработанной этим инструментом поверхности. Диагностика состояния режущего инструмента по шероховатости поверхности может быть использована для многих технологических процессов обработки резанием, особенно на чистовых режимах и операциях, когда другие методы неэффективны.

В работе /15/ рассмотрено влияние износа режущего инструмента на шероховатость обрабатываемой поверхности и выявлена связь генерируемых в процессе обработки сигналов акустической эмиссии (АЭ) с шероховатостью поверхностного слоя и износом инструмента. Выявлена корреляционная зависимость этих величин и возможность выбора оптимального закона управления шероховатостью обрабатываемой поверхности с помощью анализа кривых числа импульсов моды (амплитудного распределения сигналов АЭ) /15/.

Недостатком этого способа автоматического управления процессом механической обработки и устройства для его осуществления является большая сложность реализации алгоритма, его громоздкость, требование предварительной настройки при смене режущего инструмента и типа обрабатываемого материала.

В работах /11, 12/ рассматривается способ измерения шероховатости поверхности основанный на использовании таких приборов как профилометр - профилограф. Недостатком данного способа является то, что его невозможно применить для мгновенной, во время резания, оценки качества обработанной поверхности.

В Институте Fraunhofer по Оптике и Тонкой Механике проведено исследование /86/, относящееся к точному измерению шероховатости и различных характеристик поверхности в широких масштабах. Для обеспечения высоких требований к таким измерениям, как было установлено, необходимо комбинирование различных техник измерений с использованием метода плотности спектральной энергии (ПСЭ). Результаты исследования показали высокую точность совпадения данных по профилям, измеренным с помощью ПСЭ и другими методами – с помощью атомного микроскопа и интерферометра. С помощью двух последних методов были измерены грубые и структуризованные поверхности, а также их динамические изменения в сочетании с измерениями рассеянного света и с применением ПСЭ. Изложены результаты измерений, приведено подробное описание методов измерения и применяемых технических средств, показана эффективность сочетания различных методов измерений. Приведены также примеры измерений конкретных поверхностей.

В исследовании, проведенном в Харбинском Университете Науки и Технологии (Китай) /87/, применялся недавно разработанный метод фрактальной геометрии для описания микронеровностей. В экспериментах профили шлифованных поверхностей и поверхностей, образованных тонким точением, определялись с помощью прибора Tarlysurf – профилометром с десятью контактными щупами. При этом было выявлено влияние различных параметров процесса на фрактальный размер  $D$  и среднеарифметическое отклонение профиля  $R_a$ . Результаты проведенного анализа по-

казали, что величины  $D$  и  $R_a$  выражают различные особенности поверхности и при этом между ними не имеется линейной зависимости. При одном и том же материале величина  $D$  для шлифованной поверхности превышает величину  $D$  для тонко обточенной поверхности. При одном и том же способе обработки величина  $D$  для поверхности стальной детали превышает  $D$  для чугунной детали. Показаны возможности оценки обрабатываемости материала по величине  $D$ .

В работе /88/ предложен способ оценки шероховатости с использованием метода атомной силовой микроскопии. Опыты проводили на образцах из сплава Fe-42 Ni. Показано, что микропрофиль поверхности может быть оценен по мощности спектральной плотности и гистограммам наклона сторон микронеровностей, хорошо соответствующим закону нормального распределения.

В работе /68/ предложен метод оценки шероховатости обработанной поверхности, основанный на принципах фрактальной геометрии. С использованием спектральных моментов профиля поверхности доказано, что поверхность, обработанная точением, является анизотропной, а поверхность, обработанная шлифованием – изотропной.

В работе /89/ приводится описание метода автоматического прогнозирования шероховатости обработанной поверхности в процессе конечного фрезерования. Разработаны измерительная система, основанная на использовании акселерометра, и методика обработки измерительного сигнала с помощью нейронной сети на базе нечеткой логики. Приведены результаты, свидетельствующие о том, что шероховатость поверхности с точностью 96 % можно прогнозировать при известных скорости, глубине резания, подачи и параметрах колебаний.

В работе /105/ проанализированы факторы, влияющие на шероховатость обработанной поверхности при точении. Рассмотрены методы оцен-

ки шероховатости поверхности. Описаны механизм съема материала при точении и основные параметры процесса резания (скорость резания, подача, глубина резания). Изложены факторы, влияющие на экономичность операций точения. Приведена таблица сравнения различных величин, используемых для оценки шероховатости поверхности ( $R_t$ ,  $R_a$ ,  $R_g$ ). Рассмотрены проблемы оптимизации параметров резания и приведены некоторые рекомендации.

Задача построения математической модели объекта с помощью планирования эксперимента /58, 70/ требует формулировки цели исследования. Характеристика цели исследования, заданная качественно, называется параметром оптимизации или критерием эффективности. Параметр оптимизации является результатом изучаемого процесса, его выходом или реакцией (откликом). Параметр оптимизации должен быть эффективным с точки зрения достижения конечной цели данного исследования. Важно, чтобы параметр оптимизации был доступен для измерения. В качестве такого параметра в исследовании /70/ принята величина шероховатости поверхности в зависимости от динамических характеристик приспособления и режимов резания при торцевом фрезеровании. Получена эмпирическая зависимость показателя шероховатости обрабатываемой поверхности от режимов резания и динамических параметров применяемого установочно-зажимного приспособления.

В работе /74/ разработан способ прогнозирования шероховатости обработанной поверхности в условиях фрезерования периферийными зубьями концевой фрезы. В реальном процессе фрезерования на шероховатость поверхности оказывают влияние большое количество независимых и взаимозависимых параметров, влияние которых трудно учесть. Предложенный способ предусматривает применение нейронных сетей на первом этапе

прогнозирования, применение сплайновой интерполяции на втором этапе и применение фрактального анализа – на заключительном этапе.

В работе /90/ приведены методика и результаты экспериментального исследования корреляционной связи между уровнем сигнала акустической эмиссии и шероховатостью обработанной поверхности в условиях точения углеродистой стали твердосплавными резцами. Датчик акустической эмиссии (100-400 кГц) был установлен на державке резца. Скорость резания 100-500 м/мин, подача 0,03-0,2 мм/об, глубина резания 0,5 мм.

Кроме того, сообщается /67/ о разработанном в Институте измерений и автоматизации при университете в Касселе новом лазерном рефлексоэллипсометрическом методе (РЭМ) оценки качества поверхностей. РЭМ обладает высоким разрешением. Прибор эллипсометр с фокусируемым лазерным лучом осуществляет локальное сканирование поверхностей, позволяет сделать комбинированную оценку топографии и определять комплексный индекс рефракции материала поверхности. РЭМ применяется для идентификации материала, в частности, для распознавания и локализации модификаций сплава и явлений коррозии. Метод универсален и может широко применяться для контроля и обеспечения качества.

В работе /76/ поставлена задача построения топологии (то есть цифровой модели шероховатости) по динамическим характеристикам процесса обработки. Динамические характеристики включают в себя траектории формообразующих движений, определяющие технологические режимы, то есть программу ЧПУ станка, их вариации, связанные с колебаниями инструмента относительно обрабатываемой детали, и характеристики силовой эмиссии процесса резания. Решают взаимосвязанные проблемы динамики процесса резания и формирования микрорельефа во взаимосвязи с динамическими показателями. Последняя задача расширяет известную систему знаний по динамическому моделированию процесса обработки на раскры-

тие особенности преобразования динамических характеристик в показатели микрорельефа. Разработанные математические алгоритмы и программы позволили связать динамические показатели процесса резания с характеристиками микрорельефа и определили следующий этап знаний по исследованию процесса обработки.

В работе /46/ изложены теория и методы оценки качества сверхточных поверхностей после механической обработки. Для обработки хрупких, вязких материалов, а также композиционных материалов с металлической матрицей применялись инструменты из твердого сплава и инструмента с единичным кристаллом алмаза. Обработка осуществлялась в макро- и в микромасштабах. Сопоставлены результаты микрообработки в вязкой форме хрупких материалов (кремний,  $Al_2O_3$ , SiC) и вязких материалов (Cu-Be, Cu-Zn, Al-Si). Разработаны модели для оценки шероховатости поверхности. Эти модели были сопоставлены с экспериментальными данными. Шероховатость поверхности и целостность поверхности были исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа, сканирующего микроскопа с осязанием и с помощью профилометра. Результаты, полученные с помощью моделей, удовлетворительно согласовались с результатами экспериментов для вязких материалов, обработанных алмазным инструментом в макромасштабе, но отличались от данных в микромасштабе из-за влияния макроструктуры материала. Установлено, что для более точного использования предложенных моделей они должны учитывать кристаллическую ориентацию материала и влияние микроструктуры на шероховатость поверхности.

В Познаньском Технологическом Университете (Польша) /107/ исследована шероховатость поверхности твердых технических керамик  $Al_2O_3$  (1815  $HV_{0,5}$ ) и  $Si_3N_4$  (1809  $HV_{0,5}$ ), образуемой при прецизионном точении. Измерялись шероховатости в двух- и в трехкоординатных системах. Для

точения использовались резцы, оснащенные алмазом, изготовленные фирмами Kennametal Hertel и Sumimoto Electric, а также режущие пластины из твердого сплава с алмазным покрытием, нанесенным методом химического осаждения паров. Точение производилось как без СОЖ, так и с применением экологически чистой СОЖ сорта «EkoBiocol EP». Был определен хаотичный характер образования шероховатости с аномалиями при точении без СОЖ. Установлено, что изменение параметров шероховатости при точении носит немонотонный характер. Определены значения шероховатости в зависимости от подачи, состояния режущей кромки, сорта и структуры керамики.

Предложен способ /91/ регистрации сигнала акустической эмиссии и определение по нему значения шероховатости поверхности детали. Определяют площадь спектра сигнала акустической эмиссии, а шероховатость поверхности определяют по отношению площадей спектров зарегистрированного сигнала акустической эмиссии и определенного заранее эталонного сигнала акустической эмиссии.

В работе /106/ приведены методика и результаты экспериментального исследования шероховатости поверхности при точении алюминиевого сплава со скоростью резания 20-260 м/с. Установлено, что в общем случае увеличение скорости резания приводит к снижению шероховатости. Однако при скоростях резания выше 100 м/с со стороны вспомогательной режущей кромки резца происходит накопление расплавленного металла, что отрицательно влияет на шероховатость.

Эффективное управление процессом механической обработки лезвийным инструментом возможно лишь на основе сложных теоретических и теоретико-экспериментальных зависимостей между основными технологическими параметрами, характеризующими процесс резания (режимами обработки, геометрией детали и инструмента, физико-механическими свой-

ствами обрабатываемого и инструментального материалов и др.), и параметрами качества поверхностного слоя и точности обработки (шероховатостью поверхности, величиной остаточных напряжений, глубиной и степенью наклепа, суммарной погрешностью обработки) /47, 69/. В статье /47/ описана разработанная система управления процессом обработки, которая опробована в лабораторных условиях на различных обрабатываемых и инструментальных материалах. Комплексное решение задач внешней и внутренней оптимизации позволило помимо обеспечения заданного качества обработки деталей, их эксплуатационных свойств сократить сроки технологического проектирования, повысить производительность процесса обработки.

В статье /85/ приведена методика и результаты исследования шероховатости обработанной поверхности после алмазного прецизионного точения. Показано, что на шероховатость оказывают влияние не только подача, частота вращения, геометрия инструмента, свойства обрабатываемого материала и относительные колебания заготовки и инструмента. Кроме указанных факторов на шероховатость влияет непостоянство кристаллографической ориентации обрабатываемого материала, обуславливающие вынужденные колебания переменной частоты.

В процессе изготовления изделий с высокими эксплуатационными свойствами важно обеспечить необходимую шероховатость обработанной поверхности /100/. При резании металлов разница между фактической и расчетной высотой микронеровностей в значительной степени определяется пластической деформацией металла. Особенно заметен рост шероховатости поверхности в зоне наростообразования, хотя пластические явления захватывания и отрыва отдельных слоев под режущей кромкой при отделении стружки могут иметь место и вне зоны наростообразования. Приращение высоты микронеровностей связывают с

процессами, происходящими на передней поверхности, хотя образование микронеровностей в значительной мере осуществляет задняя поверхность.

Система назначения технологических условий обработки /1/ предназначена для расчета режимов точения, геометрии режущих инструментов и других параметров, использование которых позволяет достичь заданных показателей качества поверхностного слоя и точности обрабатываемых деталей. В качестве теоретической базы системы применены элементы теории подобия и использованы аналитические зависимости, устанавливающие связь отдельных параметров процесса резания и выходных показателей качества и точности.

Анализ существующих традиционных высотных, шаговых и опорных параметров показал, что применяемый способ нормирования требований к поверхностным неровностям еще не является в полной мере совершенным. Существующие критерии оценки качества обработанной поверхности в основном используются при разработке механизмов трения, контактного (упругого) взаимодействия твердых тел.

Проблема повышения качества обработанной поверхности в автоматизированном производстве тесно связана с разработкой новых представлений о механизме образования поверхностного слоя и управления этим процессом при резании. Механизм образования шероховатости обработанной поверхности в основном связывают с кинематикой процесса резания, а также с пластическими деформациями и высокочастотными вибрациями при резании.

Влияние пластических деформаций на формирование неровностей обработанной поверхности объясняется образованием нароста и его неустойчивостью. Однако природа образования нароста по-прежнему остается малоизученной.

Слабо изучены физические явления при резании, что сдерживает разработку методов диагностирования параметров шероховатости непосредственно в процессе резания и управление качеством поверхностного слоя. Необходим поиск новых диагностирующих признаков для прогнозирования шероховатости в процессе обработки.

Анализ литературных данных подтверждает, что эффективное управление процессом механической обработки лезвийным инструментом возможно лишь на основе сложных теоретических и теоретико-экспериментальных зависимостей между основными технологическими параметрами, характеризующими процесс резания (режимами обработки, геометрией детали и инструмента, физико-механическими свойствами обрабатываемого и инструментального материалов и др.), и параметрами шероховатости поверхности.

На основе проведенного анализа определена **цель работы: разработка новых критериев оценки, диагностики и управления качеством обработанной поверхности при резании на основе искусственного интеллекта.**

С учетом вышеизложенного, для достижения поставленной цели в настоящей диссертационной работе были определены следующие **задачи:**

1. Исследовать и углубить представления о механизме формообразования поверхностного слоя при резании.
2. Выявить и обосновать диагностирующий признак для контроля параметров шероховатости поверхности в процессе резания на основе предложенного механизма формообразования поверхностного слоя.
3. Изучить возможность использования новых информационных критериев для оценки качества обработанной поверхности и исследовать их зависимость от условий обработки.

4. Разработать аппаратное и программное обеспечение информационных критериев оценки шероховатости обработанной поверхности.

5. Разработать методы управления качеством обработанной поверхности при резании на основе искусственного интеллекта.

#### **1.4. Выводы**

1. Проведен анализ нормирования требований к неровностям на поверхности элементов детали.

2. Рассмотрено влияние условий обработки на шероховатость обработанной поверхности.

3. Проведен анализ литературных источников по современным методам диагностики и управления качеством поверхностного слоя.

4. На основе анализа литературных источников была определена цель работы и поставлены задачи исследований.

## **ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИОННЫХ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ**

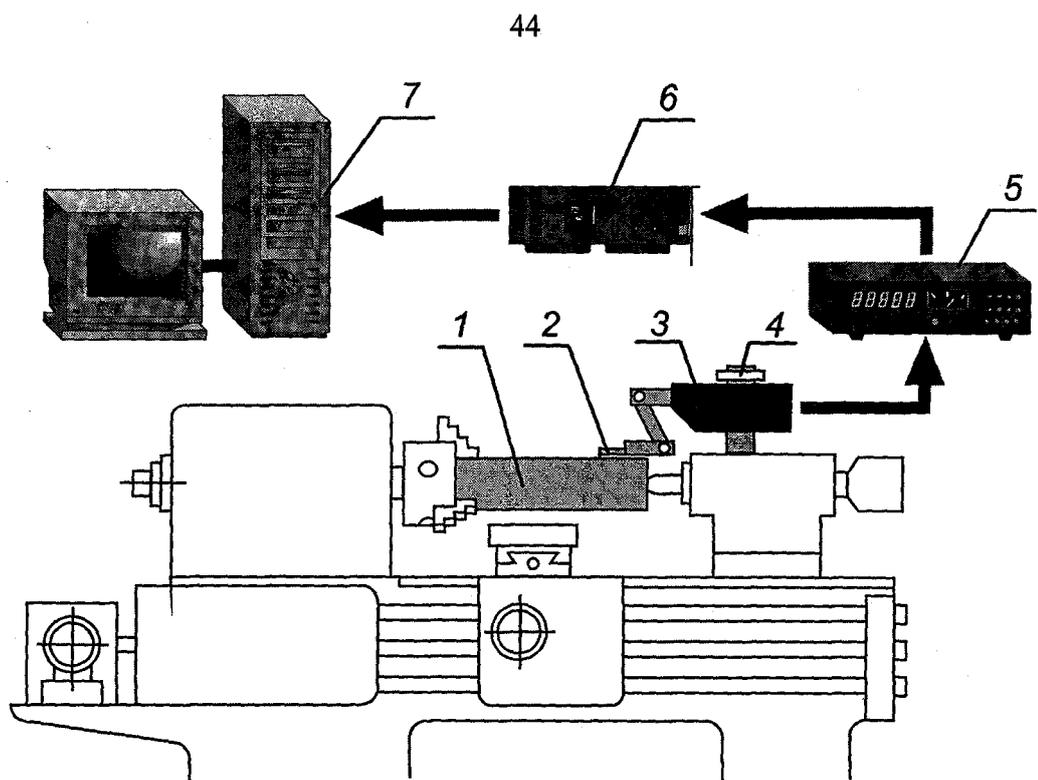
Автоматизация производства обуславливает необходимость разработки новых критериев оценки шероховатости поверхности, которые позволяли бы диагностировать ее в процессе обработки. Поэтому в данной главе изложена новая методика оценки шероховатости обработанной поверхности, рассмотрено аппаратное обеспечение результатов измерений, разработаны алгоритмы предложенных критериев оценки шероховатости поверхности.

### **2.1. Стенд для исследования шероховатости обработанной поверхности**

Для оценки параметра  $R_a$ , характеризующего шероховатость обработанной поверхности, использовался стенд, включающий заготовку, закрепленную в центрах, профилометр модели 296, подключенный через интерфейс к РС IBM.

Действие экспериментальной установки (рисунок 2.1) основано на принципе ощупывания неровностей исследуемой поверхности и преобразования возникающих при этом механических колебаний щупа в изменение электрического сигнала пропорционального этим колебаниям.

Преобразования линейных колебаний иглы, соответствующих неровностям поверхности заготовки 1, в электрические сигналы производятся датчиком 2.



1 – заготовка; 2 – щуп с датчиком; 3 – привод щупа; 4 – стойка;

5 – профилометр; 6 – плата АЦП; 7 – ПЭВМ

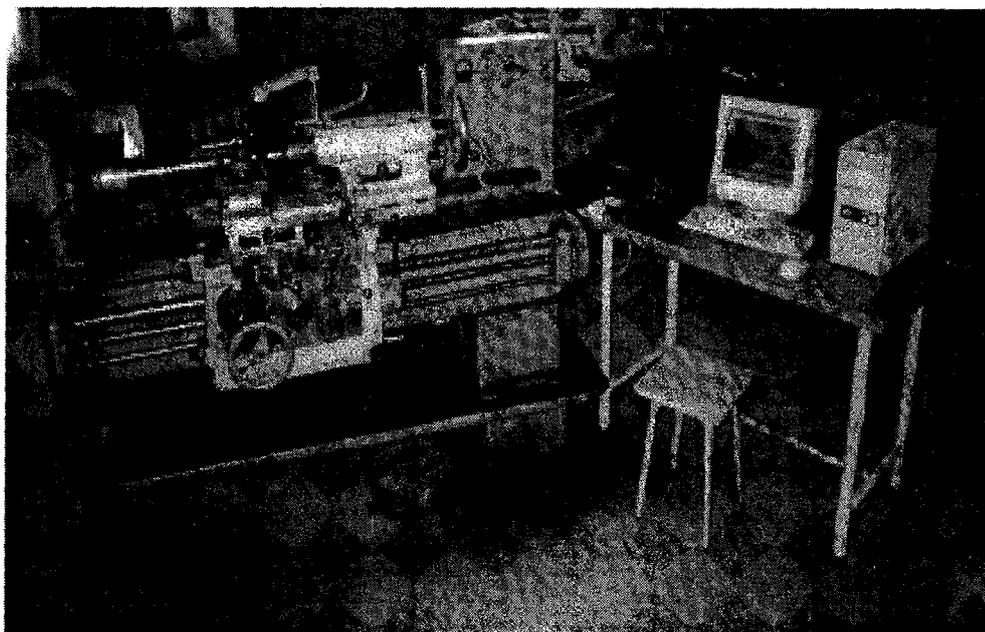


Рисунок 2.1. Схема и общий вид экспериментальной установки для исследования профиля получаемой поверхности при токарной обработке

Перемещение датчика по измеряемой поверхности осуществляется с помощью привода 3, который устанавливается на поворотный кронштейн стойки 4. Сигнал с датчика 2 поступает на электронный профилометр 5, снабженный аналоговым выходом для сопряжения с внешней измерительной аппаратурой. С аналогового выхода сигнал, посредством платы 6 аналого-цифрового преобразователя, поступает в персональную ЭВМ 7.

Результаты измерения в цифровом виде с помощью специальной программы создавались в виде отдельных файлов на различных носителях информации (компакт-дисках).

## **2.2. Аппаратное обеспечение результатов измерений**

Для измерения параметра шероховатости  $R_a$  применяли профилометр модели 296 с цифровым отсчетом и с индуктивным преобразователем механических колебаний щупа в изменение электрического сигнала, пропорционального этим колебаниям. Диапазон измерения параметра  $R_a$  составляет 0,02 – 10 мкм, минимальный шаг неровностей измеряемой поверхности – 0,004 мм. Длина трассы ошупывания при измерении составляет 1,5; 3; 6 мм, скорость трассирования датчика –  $1 \pm 0,04$  мм/с. Предел допускаемой систематической составляющей приведенной погрешности – 10 %, предел допускаемого среднеквадратического отклонения случайной составляющей – 2 %.

На рисунке 2.2 представлена профилограмма поверхности при измерении стали 45 с различными масштабами увеличения.

Точность воспроизведения профиля неровностей поверхности щуповым методом зависит в первую очередь от погрешностей огибания поверхности щупом и от погрешности преобразования механических колебаний иглы в электрические колебания.

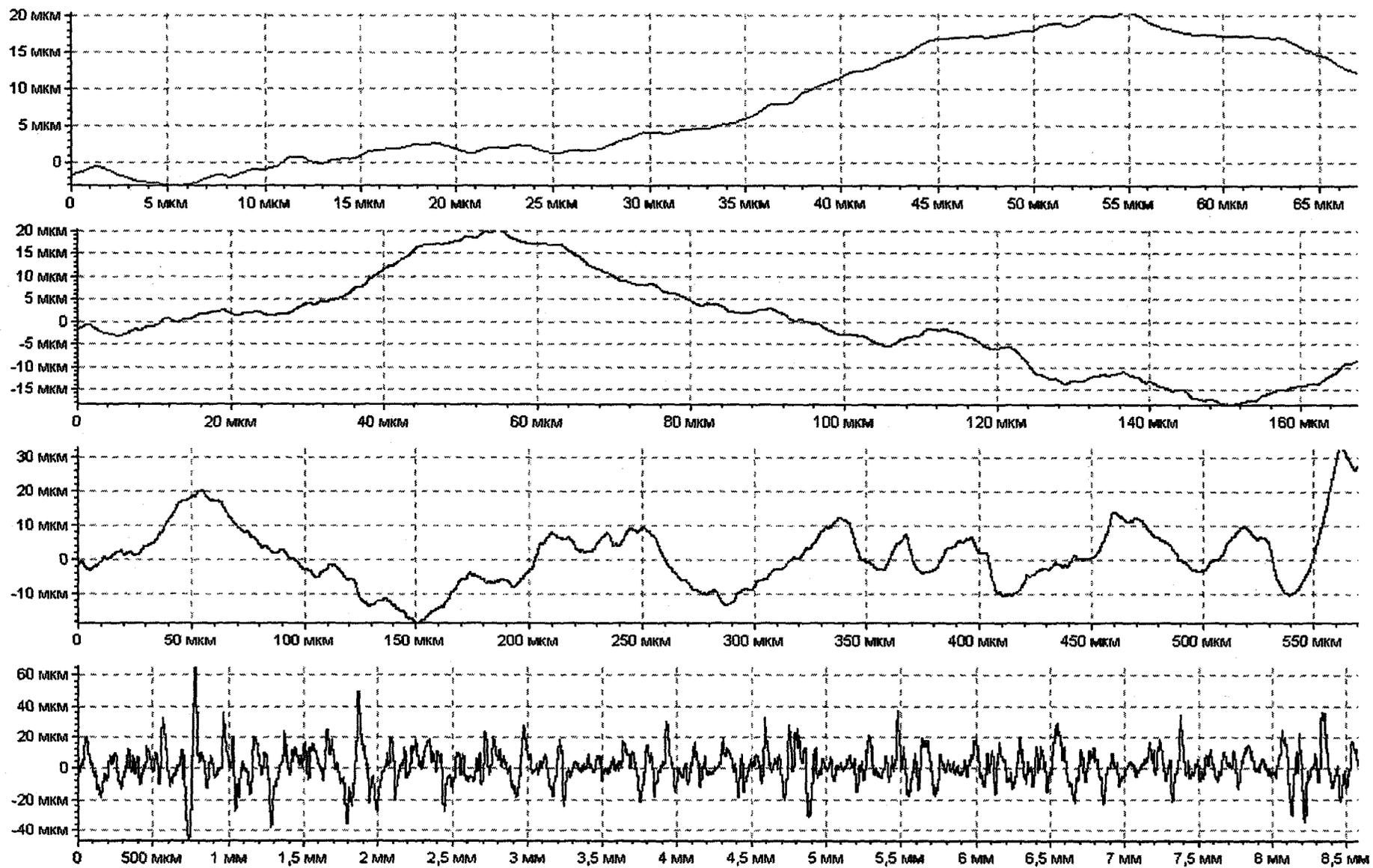


Рисунок 2.2. Профилограмма шероховатости поверхности (сталь45,  $t=1\text{ мм}$ ,  $s=0.11\text{ мм/об}$ ,  $n=50\text{ мин}^{-1}$ )

В процессе огибания траектория движения центра иглы не совпадает с огибаемым профилем по следующим причинам:

- 1) наличия конечного радиуса закругления рабочего конца иглы и, следовательно, недоощупывания (когда игла не может войти в глубокие узкие впадины);
- 2) деформации испытываемой поверхности и иглы под действием измерительного усилия;
- 3) отрыва иглы от профиля под влиянием инерционных сил;
- 4) отклонения траектории иглы от заданного направления.

Иглы современных приборов, работающих по щуповому методу, выполняют обычно из алмаза с радиусом закругления от 2,5 до 12,5 мкм. Радиус изношенной иглы доходит до 30 мкм. Для повышения износостойкости иглы ее конец выполняют коническим с углом конуса  $90 - 100^\circ$ . Меньшие углы не требуются, так как углы наклона боковых сторон профилей неровностей технических поверхностей обычно не превышает  $10 - 20^\circ$  относительно горизонтальной плоскости.

В качестве аналого-цифрового преобразователя (АЦП) используется двухканальный запоминающий осциллограф ЛА-н10мб. Данная модель обладает восьмиразрядным быстродействующим АЦП и собственным оперативным запоминающим устройством, емкостью 128 Кб. Конструктивно осциллограф выполнен в виде расширяющего модуля для персональных ЭВМ типа IBM PC AT и позволяет производить обмен информации с ПЭВМ непосредственно по шине ISA.

Персональная ЭВМ служит для управления всей экспериментальной установкой. В функции персональной ЭВМ входит управление приводом щупа, построение микрорельефа исследуемой поверхности, хранение и обработка полученных данных.

### 2.3. Алгоритмы оценки фрактальности, погрешности самоподобия и информационной энтропии шероховатости

#### 2.3.1. Требования к исходным данным

Для вычисления таких статистических средних, как фрактальная размерность, энтропия, погрешность самоподобия и других характеристик, являющихся информационными критериями нелинейной динамики, необходимо иметь множество точек, определенных в фазовом пространстве и принадлежащих аттрактору. Число точек  $M$  в расчетах конечно, но обязано быть достаточно большим. В случае, когда динамическая система задана дискретным оператором отображения, точки находятся автоматически после задания начальных условий. Если динамическая система задана системой дифференциальных уравнений, то в общем случае решение может быть найдено только численным интегрированием системы на компьютере. Обычно используют метод Рунге-Кутты 4-го порядка, погрешность задают  $10^{-4}$ - $10^{-8}$ , шаг счета определяется конкретной системой и должен быть выбран в сравнении с наименьшим из ее характерных времен.

Однако часто требуется вычислить характеристики аттрактора некоторой реальной системы, математическая модель которой неизвестна. При этом, как правило, неизвестна и размерность ее фазового пространства. В этой ситуации мы располагаем информацией о поведении во времени какой-либо одной из динамических переменных. К тому же и интервал времени экспериментальной реализации естественно ограничен. Можно ли в таких условиях получить характеристики аттрактора?

Путь к решению этой проблемы был предложен Такенсом. Доказано, что почти для всех гладких динамических систем по имеющейся временной реализации одной наблюдаемой динамической переменной можно

сконструировать новый аттрактор, основные свойства которого будут такими же, как у исходного.

В большом числе последних экспериментальных работ показано, что часто контурная длина поперечного сечения шероховатой поверхности описывается с помощью фрактальной степенной зависимости /4, 6, 20, 21, 36, 40, 52, 54, 61, 102/. В данной работе приводится краткий обзор результатов использования фрактальных характеристик при описании шероховатых поверхностей. Границы многих твердых тел являются шероховатыми и обладают фрактальными свойствами. Это проявляется, в частности, в том, что при уменьшении масштаба измерения шероховатой поверхности ее длина не стремится к конечному пределу, а возрастает степенным образом /61/.

Фрактальные свойства поверхностей обнаружены у самых различных объектов как естественного, так и искусственного происхождения. Для поверхностей ряда материалов фрактальные свойства проявляются, начиная с атомных масштабов, и охватывают пространственные масштабы в диапазоне нескольких порядков. Поясним на простом примере основной признак фрактального объекта. Будем измерять длину линии профиля шероховатой поверхности отрезками  $\delta$ . Тогда, если линия фрактальна, то она обладает следующим свойством: при  $\delta$ , стремящимся к нулю, суммарная длина отрезков  $L = N(\delta) \cdot \delta$  не стремится к конечному пределу, как для гладкой линии, а неограниченно возрастает по степенному закону

$$N(\delta) \cdot \delta \propto \delta^{1-D}, \quad (2.1)$$

где  $D$  – безразмерная постоянная, часто называемая *хаусдорфовой* или *фрактальной размерностью* кривой, а  $N(\delta)$  – число отрезков, необходимых для покрытия фрактальной линии /102/.

При практическом определении фрактальной размерности отрезка фрактальной кривой часто применяется формула, которая вытекает из (2.1):

$$D = \frac{\ln(N(\delta))}{\ln(1/\delta)}. \quad (2.2)$$

Величина  $D$  является *локальной* характеристикой объекта.

Одним из основных свойств фракталов является **самоподобие**. В самом простом случае небольшая часть фрактала содержит информацию обо всем фрактале.

Другим важным свойством фракталов является их **иерархичность**, т.е. способность повторяться в разных масштабах пространства и времени. Однако существует четкий критерий принадлежности объекта к фракталам – объект нельзя считать фрактальным, если он не обладает свойством самоподобия, но можно – если он не иерархичен.

Следует отметить, что свойство точного самоподобия характерно лишь для *регулярных фракталов*. Если вместо детерминированного способа построения включить в алгоритм их создания некоторый элемент случайности, то возникают так называемые *случайные фракталы*. Основное их отличие от регулярных состоит в том, что свойства самоподобия справедливы только после соответствующего усреднения по всем статистически независимым реализациям объекта. При этом увеличенная часть фрактала не точно идентична исходному фрагменту, однако их статистические характеристики совпадают.

Случайные фракталы в некоторых случаях называют *неоднородными фракталами*. Для полного описания неоднородных фрактальных объектов, в отличие от регулярных фракталов, недостаточно введения всего лишь одной величины, его фрактальной размерности  $D$ , а необходим целый спектр таких размерностей, число которых, вообще говоря, бесконечно [4]. Причина этого заключается в том, что наряду с чисто геометриче-

скими характеристиками, определяемыми величиной  $D$ , такие фракталы обладают и некоторыми статистическими свойствами.

Под словом «неоднородный» понимается неравномерное распределение точек множества по фракталу. Причина неоднородности в основном одна – разные вероятности заполнения геометрически одинаковых элементов фрактала или несоответствие вероятностей заполнения геометрическим размерам соответствующих областей. Такие неоднородные фрактальные объекты в литературе называются *мультифракталами*.

### 2.3.2. Алгоритмы оценки фрактальных размерностей

Рассмотрим фрактальный объект, занимающий некую ограниченную область размера  $L$  в Евклидовом пространстве с размерностью  $d$ . Пусть на каком-то этапе его построения он представляет собой множество из  $N \gg 1$  точек, как-то распределенных в этой области. Будем предполагать, что, в конце концов,  $N \rightarrow \infty$ . Разобьем всю область  $L$  на кубические ячейки со стороной  $\varepsilon \ll L$  и объемом  $\varepsilon^d$ . Далее нас будут интересовать только занятые ячейки, в которых содержится хотя бы одна точка. Пусть номер занятых ячеек  $i$  изменяется в пределах  $i = 1, 2, \dots, N(\varepsilon)$ , где  $N(\varepsilon)$  – суммарное количество занятых ячеек, которое, конечно, зависит от размера ячейки  $\varepsilon$ .

Пусть  $n_i(\varepsilon)$  представляет собой количество точек в ячейке с номером  $i$ , тогда величина

$$p_i(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{n_i(\varepsilon)}{N} \quad (2.3)$$

представляет собой вероятность того, что наугад взятая точка из нашего множества находится в ячейке  $i$ . Другими словами, вероятности  $p_i$  характеризуют относительную заселенность ячеек.

Из условия нормировки вероятности следует, что

$$\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i(\varepsilon) = 1 \quad (2.4)$$

Введем теперь в рассмотрение *обобщенную статистическую сумму*  $Z(q, \varepsilon)$ , характеризуемую показателем степени  $q$ , который может принимать любые значения в интервале  $-\infty < q < +\infty$

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon). \quad (2.5)$$

Спектр обобщенных фрактальных размерностей  $D_q$ , характеризующих данное распределение точек в области  $L$ , определяется с помощью

$$\text{соотношения} \quad D_q = \frac{\tau(q)}{q-1}, \quad (2.6)$$

где функция  $\tau(q)$  имеет вид

$$\tau(q) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln Z(q, \varepsilon)}{\ln \varepsilon}. \quad (2.7)$$

Если  $D_q = D = \text{const}$ , т.е. не зависит от  $q$ , то данное множество точек представляет собой обычный, регулярный фрактал, который характеризуется всего лишь одной величиной – фрактальной размерностью  $D$ . Напротив, если функция  $D_q$  как-то меняется с  $q$ , то рассматриваемое множество точек является мультифракталом.

Таким образом, мультифрактал в общем случае характеризуется некоторой *нелинейной* функцией  $\tau(q)$ , определяющей поведение статистической суммы  $Z(q, \varepsilon)$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q(\varepsilon) \approx \varepsilon^{\tau(q)} \quad (2.8)$$

### 2.3.3. Фрактальная $D_0$ и информационная $D_1$ размерности

Выясним теперь, какой физический смысл имеют обобщенные фрактальные размерности  $D_q$  для некоторых конкретных значений  $q$ . Так, при  $q = 0$  из выражения (2.5) следует, что

$$Z(0, \varepsilon) = N(\varepsilon). \quad (2.9)$$

С другой стороны, согласно формулам (2.8) и (2.6), имеем

$$Z(0, \varepsilon) \approx \varepsilon^{\tau(0)} = \varepsilon^{-D_0} \quad (2.10)$$

Сопоставляя эти два равенства, приходим к соотношению

$$N(\varepsilon) \approx \varepsilon^{-D_0}$$

Это означает, что величина  $D_0$  представляет собой обычную *Хаусдорфову размерность* множества. Она является наиболее грубой характеристикой мультифрактала и не несет информации о его статистических свойствах.

Выясним теперь смысл величины  $D_1$ . Поскольку при  $q = 1$ , в силу условия нормировки вероятности (2.4), статистическая сумма равна

$$Z(1, \varepsilon) = 1, \text{ то } \tau(1) = 0.$$

Таким образом, имеется неопределенность в выражении (2.6) для  $D_1$ . Раскроем эту неопределенность с помощью очевидного равенства

$$Z(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^q = \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \exp[(q-1) \ln p_i] \quad (2.11)$$

Теперь, устремляя  $q \rightarrow 1$ , раскладывая экспоненту и учитывая условие нормировки (2.4), получаем

$$Z(q \rightarrow 1, \varepsilon) \approx \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} (p_i + (q-1)p_i \ln p_i) = 1 + (q-1) \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \ln p_i \quad (2.12)$$

В результате приходим к следующему выражению:

$$D_1 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \ln p_i}{\ln \varepsilon} \quad (2.13)$$

С точностью до знака числитель в этой формуле представляет собой *энтропию* фрактального множества  $S(\varepsilon)$ :

$$S(\varepsilon) = - \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i \ln p_i \quad (2.14)$$

Такое определение энтропии множества полностью идентично используемому в термодинамике, где под  $p_i$  понимается вероятность обнаружить систему в квантовом состоянии  $i$ . В результате величина обобщенной фрактальной размерности  $D_1$  связана с энтропией  $S(\varepsilon)$  соотношением

$$D_1 = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{S(\varepsilon)}{\ln(\varepsilon)} \quad (2.15)$$

В термодинамике энтропия есть мера беспорядка в системе. Клод Шеннон /103/ обобщил понятие энтропии  $S$ , известное в термодинамике, на абстрактные задачи теории передачи и обработки информации. Для этих задач энтропия стала мерой количества информации, необходимой для определения системы в некотором положении  $i$ . Другими словами, она является мерой нашего незнания о системе.

Из выражения (2.15) следует, что

$$S(\varepsilon) \approx \varepsilon^{-D_1} \quad (2.16)$$

Таким образом, величина  $D_1$  характеризует информацию, необходимую для определения местоположения точки в некоторой ячейке. В связи с этим обобщенную фрактальную размерность  $D_1$  часто называют *информационной размерностью*.

Она показывает, как информация, необходимая для определения местоположения точки, возрастает при стремлении размера ячейки  $\varepsilon$  к нулю.

Энтропия  $S$  и величина  $D_1$  играют важную роль в анализе нелинейных динамических систем, особенно в описании потерь информации при эволюции хаотической системы во времени /108/. В этом контексте энтропия  $S$  называется информационной энтропией и обозначается  $H(H_1)$ .

#### 2.3.4. Корреляционная размерность $D_2$

Рассмотрим еще один частный случай,  $q = 2$ , и покажем, какой физический смысл имеет обобщенная фрактальная размерность  $D_2$ . Для нее справедливо следующее выражение

$$D_2 = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^2}{\ln \varepsilon} \quad (2.17)$$

Определим парный корреляционный интеграл. Величина  $p_i$ , согласно своему определению (2.3), представляет собой вероятность попадания точки в  $i$ -ю ячейку с размером  $\varepsilon$ . Следовательно, величина  $p_i^2$  представляет собой вероятность попадания в эту ячейку двух точек. Суммируя  $p_i^2$  по всем занятым ячейкам, мы получаем вероятность того, что две произвольно выбранные точки из множества лежат внутри одной ячейки с размером  $\varepsilon$ . Следовательно, расстояние между этими точками будет меньше или порядка  $\varepsilon$ . Таким образом, с точностью до численных коэффициентов получаем

$$I(\varepsilon) \approx \sum_{i=1}^{N(\varepsilon)} p_i^2 \approx \varepsilon^{D_2} \quad (2.18)$$

Приходим к выводу, что обобщенная размерность  $D_2$  определяет зависимость корреляционного интеграла  $I(\varepsilon)$  от  $\varepsilon$  в пределе  $\varepsilon \rightarrow 0$ .

По этой причине величину  $D_2$  в литературе называют корреляционной размерностью. Ее главное практическое преимущество состоит в том, что в случае «практических» фракталов ее можно сравнительно легко определить. Теоретическая значимость размерности  $D_2$  обусловлена ее тесной связью с таким фундаментальным понятием, как корреляция.

### 2.3.5. Свойства функции $D_q$

Как уже отмечалось, мультифрактал характеризуется неоднородным распределением точек по ячейкам. Как известно из термодинамики, энтропия неоднородного распределения молекул газа в сосуде всегда меньше энтропии их однородного распределения (в том же сосуде), когда газ везде обладает одной и той же плотностью. Соответственно, если бы точки, составляющие мультифрактал, были бы распределены по нему равномерно по всем  $N(\epsilon)$  ячейкам с вероятностью  $p_i = 1 / N(\epsilon)$ , энтропия такого распределения была бы максимальна и равна:

$$S_{\max}(\epsilon) = - \sum_{i=1}^{N(\epsilon)} p_i \ln p_i = \ln N(\epsilon) \approx -D_0 \ln \epsilon \quad (2.19)$$

Другими словами, она была бы больше фактической величины энтропии мультифрактала, рассчитанной для реального неоднородного распределения точек,  $S(\epsilon) = -D_1 \ln \epsilon$ .

Отсюда следует важный вывод, что информационная размерность мультифрактала  $D_1$  всегда меньше или равна хаусдорфовой размерности  $D_0$ , что подтверждено результатами проведенных исследований (см. главу 4, рисунки 4.1 – 4.3).

Это неравенство можно обобщить для произвольного показателя степени  $q$  и доказать, что обобщенная фрактальная размерность  $D_q$  всегда монотонно убывает (или остается постоянной) с ростом  $q$

$$D_q \geq D_{q'} \quad \text{при } q' > q. \quad (2.20)$$

Знак равенства имеет место, например, для однородного фрактала. Максимального значения  $D_{\max} = D_{-\infty}$  величина  $D_q$  достигает при  $q \rightarrow -\infty$ , а минимального  $D_{\min} = D_{\infty}$  при  $q \rightarrow \infty$ .

Для образования фракталов необходимо наличие энергетических процессов, возникающих в частности, при управляемом микро - и макро-разрушении с высокой интенсивностью деформирования ( $10^5 - 10^9 \text{ с}^{-1}$ ), что типично для процессов трения, изнашивания и резания.

Определение фрактальных размерностей производилось по временным рядам, т.е. последовательности измеренных значений параметра шероховатости  $R_a$ . Временной ряд – есть «случайное» хаотическое множество. Анализ поведения данного хаотического множества на заданном временном интервале можно провести на основе результатов анализа алгоритма подобия временного ряда самому себе (см. раздел 2.3.8).

### 2.3.6. Алгоритм вычисления фрактальной размерности шероховатости поверхности

Рассмотрим какое-либо множество точек  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , расположенных в  $m$ -мерном пространстве (см. рисунок 2.3). Опишем вокруг какой-либо точки  $X_i$  сферу радиуса  $r$  и подсчитаем число точек  $M(X_i, r)$ , попавших внутрь сферы. Вероятность того, что выборочная точка окажется внутри сферы, мы получим, разделив  $M(X_i, r)$  на полное число точек в исследуемом множестве:

$$P(X_i, r) = \frac{M_i(X_i, r)}{N} \quad (2.21)$$

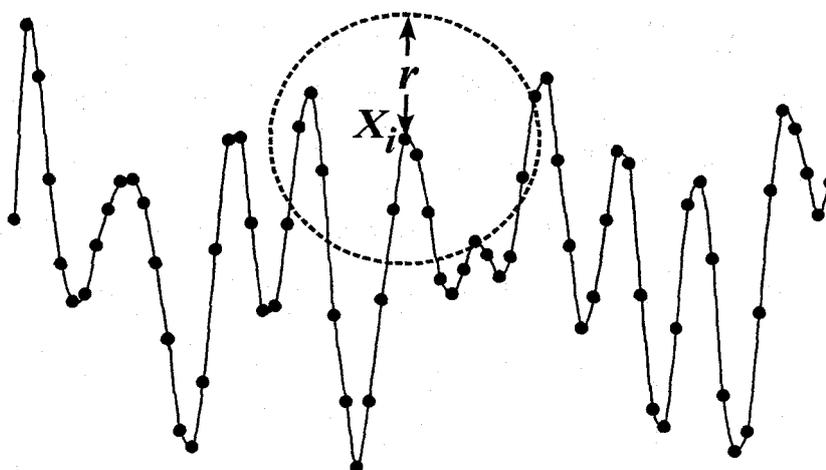


Рисунок 2.3. График профиля исследуемой поверхности с выборочными точками и окружностью, внутри которой производится подсчет выборочных точек

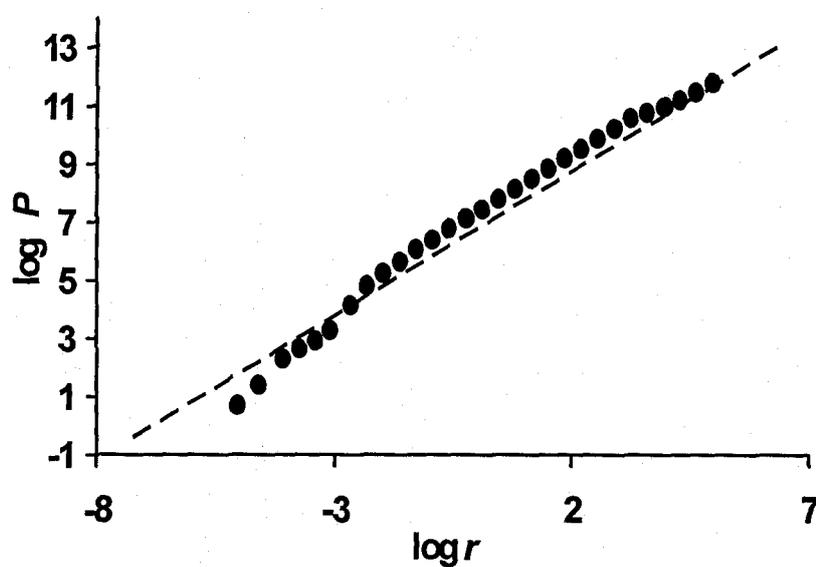


Рисунок 2.4. Пример оценки емкости  $D_0(X_i)$  методом линейной аппроксимации

Как следует из определения фрактальной размерности при малых  $r$  вероятность  $P(X_i, r)$  должна вести себя как  $\approx r^{-D_0}$ , где  $D_0$  – Хаусдорфова размерность множества. В таком случае:

$$D_0(X_i) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log P(X_i, r)}{\log r} \quad (2.22)$$

Для некоторых множеств это определение не зависит от выбора точки  $X_i$ . Но для многих других множеств  $D_0$  зависит от  $X_i$ , и поэтому лучше пользоваться усредненной поточечной размерностью. Кроме того, для многих множеств, таких как канторовское множество, в распределении точек имеются щели, или пробелы и поэтому  $P(X_i, r)$  при  $r \rightarrow 0$  перестает быть непрерывной функцией от  $r$ .

Чтобы получить усредненную поточечную размерность, выбирают случайным образом множество точек размером  $L < N$  и в каждой его точке вычисляют  $P(X_i, r)$ . После того как это сделано, усредненная Хаусдорфова размерность множества вычисляется по формуле:

$$\hat{D}_0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L D_0(X_i)$$

Число  $L$  подбирают опытным путем, начиная с какого-нибудь малого значения, и постепенно увеличивают его до тех пор, пока  $\hat{D}_0$  не достигнет предела.

С вычислительной точки зрения процедура подсчета величин  $M(X_i, r)$  путем варьирования параметра  $r$  несколько неудобна, так как априорно неизвестны критерии выбора граничных значений  $r_{\max}$  и  $r_{\min}$ . Неизвестен также алгоритм назначения коэффициента приращения  $\mu < 1$  для формирования прогрессии  $r_{j+1} = \mu r_j$ . Для получения гладкой зависимости  $P(X_i, r)$  приращение  $\mu$  не должно быть слишком большим. Но и слишком малые значения  $\mu$  приведут к избыточным вычислительным затратам.

Поэтому применим следующий вычислительный прием – рассчитаем расстояния  $\rho$  от точки  $X_i$  до всех точек исследуемого множества (используя операцию вычитания векторов):

$$\rho_k = |\bar{X}_k - \bar{X}_i|, \quad k = 1, 2, \dots, N.$$

Затем произведем сортировку полученного числового ряда  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$  таким образом, чтобы для любого  $k$  выполнялось условие  $\rho_k \leq \rho_{k+1}$ .

Нетрудно заметить, что после подобных преобразований мы получим последовательность радиусов сфер  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$  для которых количество попавших внутрь сферы выборочных точек равно  $1, 2, \dots, N$  соответственно. То есть для любого  $k$  будет справедливо равенство:

$$M(X_i, \rho_k) = k. \quad (2.23)$$

Кроме того, теперь мы легко сможем определить искомые граничные значения радиуса:  $r_{\max} = \rho_N, r_{\min} = \rho_2$ , и коэффициент приращения:

$$\mu = Q \sqrt{\frac{r_{\min}}{r_{\max}}},$$

где  $Q$  – желаемое количество членов прогрессии  $r_{\max}, \dots, r_j, \dots, r_{\min}$  (обычно выбирается в пределах 80 – 100).

Зная эти величины, вычислим значения всех членов прогрессии:

$$r_j = r_{\max} \cdot \mu^{j-1}, \quad j = 1, 2, \dots, Q.$$

Затем для каждого  $r_j$  найдем такое значение индекса  $k_j$  ряда  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$ , чтобы выполнялось условие:

$$\rho_{k_j} \leq r_j < \rho_{k_j+1}.$$

Из полученного числового ряда  $k_1, k_2, \dots, k_Q$  исключим повторяющиеся члены и используем данный ряд для вычисления вероятностей  $P(X_i, \rho_{k_j})$  согласно формуле (2.21), которая с учетом выражения (2.23) упрощается до вида:

$$P(X_i, \rho_{k_j}) = \frac{k_j}{N}.$$

Теперь выражение (2.22) будет выглядеть следующим образом:

$$D_0(X_i) = \lim_{\rho_{k_j} \rightarrow 0} \frac{\log P(X_i, \rho_{k_j})}{\log \rho_{k_j}}. \quad (2.24)$$

На практике нахождение предела (2.24) сводится к поиску «наиболее линейного» участка зависимости  $\log P(X_i, \rho_{k_j})$  от  $\log \rho_{k_j}$  и построению линейной аппроксимации вида:  $\log P(X_i, \rho_{k_j}) = b \log \rho_{k_j} + c$  по методу наименьших квадратов (как показано на рисунке 2.4). В качестве оценки поточечной размерности берется  $D_0(X_i) = b$ .

Наиболее трудно формализовать в этом алгоритме выбор линейного участка, по которому следует оценивать емкость. На наш взгляд в этом случае следует действовать следующим образом: необходимо просто удалить из множества  $\rho_{k_j}$  все точки, которые вносят нелинейность в зависимость  $\log P(X_i, \rho_{k_j})$  от  $\log \rho_{k_j}$ , тогда оставшиеся точки будут лежать на линейном участке.

Реализовать данную процедуру можно путем итерационного алгоритма. Для каждого члена множества  $\rho_{k_1}, \rho_{k_2}, \dots, \rho_{k_q}$  производится тест — данный член временно удаляют из множества и вычисляют коэффициент  $S$  корреляции между  $\log P(X_i, \rho_{k_j})$  и  $\log \rho_{k_j}$  оставшихся членов, а после теста опять возвращают во множество. Тот член множества, при тестировании которого, наблюдается наибольшее увеличение корреляции  $S$ , следовательно, вносит наибольшую нелинейность и его необходимо выбраковать из множества. Итерации выбраковки продолжают до тех пор, пока количество  $q$  членов множества  $\rho_{k_j}$  не уменьшится до 3–5. После этого мы мо-

жем быть уверены, что оставшиеся  $q$  точек лежат на линейном участке зависимости  $\log P(X_i, \rho_{k_j})$  от  $\log \rho_{k_j}$ .

Таким образом, получаем следующий алгоритм вычисления фрактальной размерности  $D_0$  Хаусдорфа (см. рисунок 2.5):

1. Введем переменную суммирования:  $S_{D_0} = 0$ .
2. Зададим цикл для  $i$  от 1 до  $L$ . В исследуемом множестве точек  $X_1, X_2, \dots, X_N$  случайным образом выберем точку  $X_i$ .
3. Рассчитаем расстояния  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$  от точки  $X_i$  до всех точек исследуемого множества.
4. Отсортируем множество  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$  в порядке возрастания.
5. Сформируем из множества  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$  новое множество  $\rho_{k_1}, \rho_{k_2}, \dots, \rho_{k_q}$ , необходимое для нахождения предела (2.24).
6. Выбракуем из множества  $\rho_{k_1}, \rho_{k_2}, \dots, \rho_{k_q}$  точки лежащие на нелинейных участках.
7. Вычислим величину  $D_0(X_i)$  методом линейной аппроксимации.
8. Произведем суммирование:  $S_{D_0} = S_{D_0} + D_0(X_i)$ .
9. Проверим условие конца цикла: если  $i < L$ , то увеличиваем значение  $i$  на 1 и переходим на шаг 3.
10. Иначе останавливаем цикл и вычисляем конечный результат:  

$$D_0 = S_{D_0} / L.$$

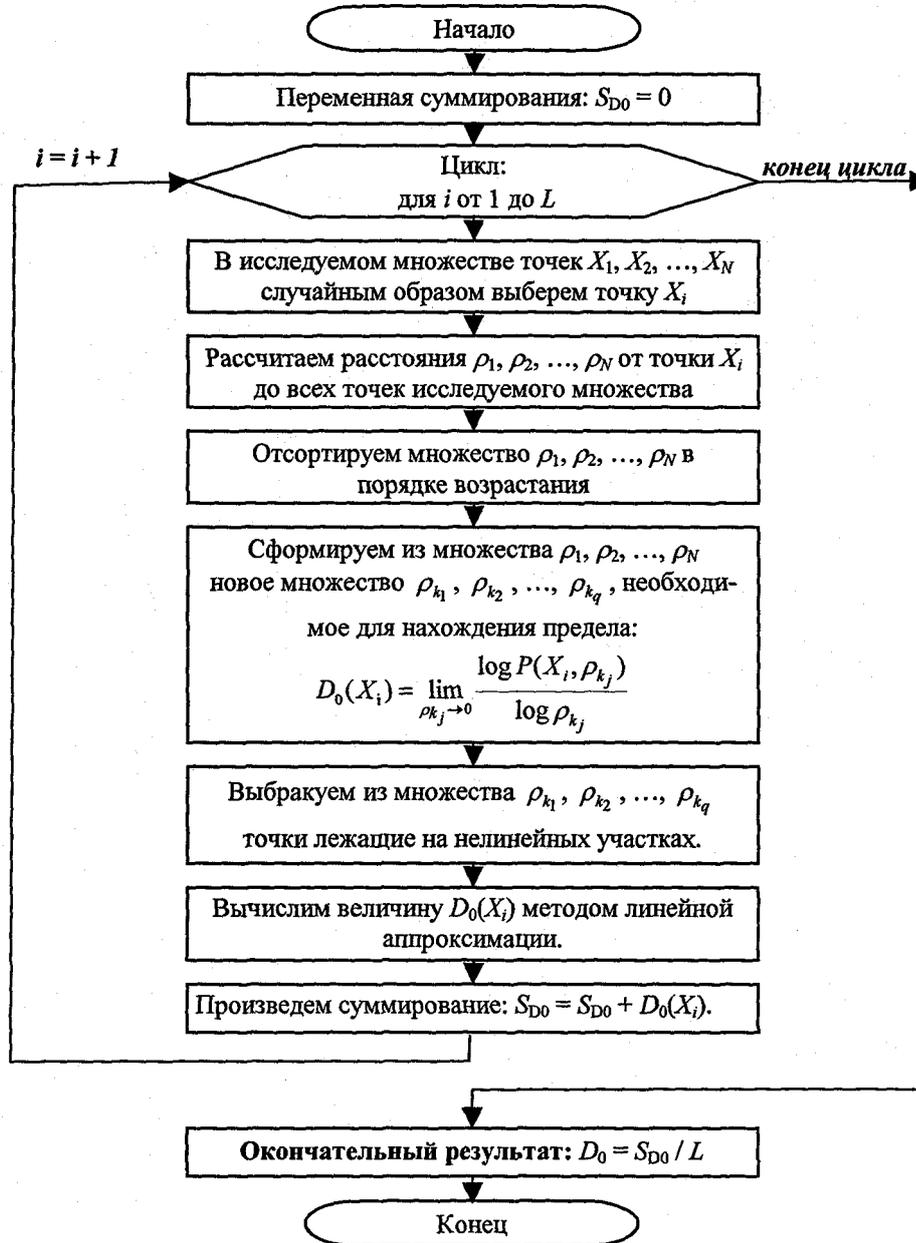


Рисунок 2.5. Блок-схема алгоритма расчета фрактальной размерности Хаусдорфа

Проверка выше предложенного алгоритма проводилась с помощью модельных данных. В качестве моделей использовался регулярный фрактал – канторовское множество, состоящее из  $N = 262144$  точек и двухмерный странный аттрактор – отображение Хенона с таким же количеством точек:

$$\begin{cases} x_{j+1} = 1 - a^2 x_j + b y_j, \\ y_{j+1} = x_j \end{cases}, \text{ для } a = 1.4, b = 0.3, j = 1, 2, \dots, N.$$

Путем вычислительного эксперимента было определено, что при длине выборки  $N = 262144$  и использовании параметра  $L$  равного 100 точкам, погрешность предложенного алгоритма вычисления фрактальной размерности  $D_0$  модельных данных не превышает 5%, а для достижения погрешности, не превышающей 2%, необходимо использовать  $L = 500$  циклов усреднения.

Так как относительная погрешность используемых нами измерительных приборов составляет 2% и предполагается исследовать выборки вдвое меньшей чем модельные данные длины ( $N = 2^{17} = 131072$ ), то значение  $L = 500$  признано наиболее оптимальным. Пример расчета фрактальной размерности Хаусдорфа для исследуемого профиля поверхности приведен на рисунке 2.6.

### 2.3.7. Алгоритм расчета информационной энтропии

Энтропия (S или H) – это производное понятие от понятия «состояние объекта» или «фазовое пространство объекта». Она характеризует степень вариативности микросостояния объекта. Качественно, чем выше энтропия, тем в большем числе существенно различных микросостояний может находиться объект при данном макросостоянии.

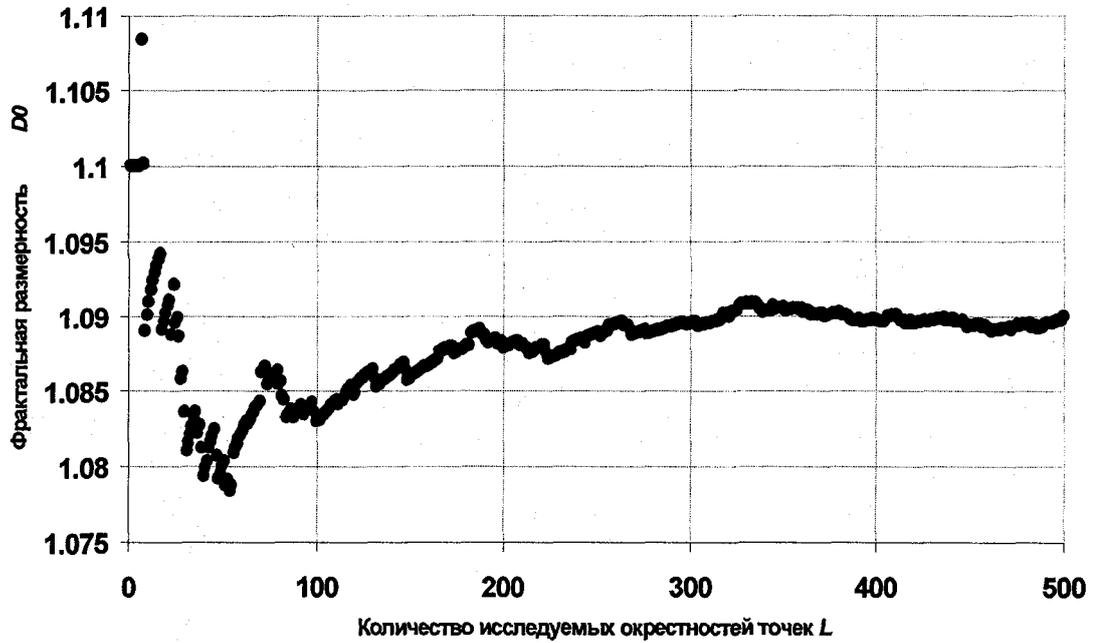


Рисунок 2.6. Использование поточечного метода для определения фрактальной размерности Хаусдорфа профиля исследуемой поверхности длиной 131072 отсчетов

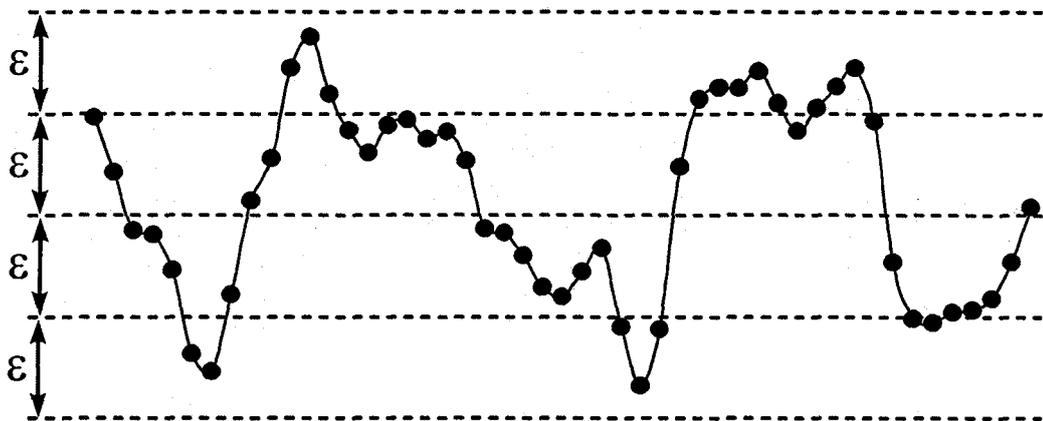


Рисунок 2.7. Профиль поверхности детали с выборочными точками (дискретными значениями, зафиксированными измерительным прибором) и диапазонами, внутри которых производится подсчет выборочных точек

Исторически первым примером была энтропия нагретого физического тела, которая интерпретируется как неопределенность положений и импульсов молекул при данной температуре, играющей роль макросостояния.

В теории информации энтропию вводят для систем, которые могут находиться в некоторых состояниях. Основы этой теории заложил Клод Шеннон, который в 1948 г. предложил формулу для оценки неопределенности кодовой информации в каналах связи [4, 103], называемую энтропией Шеннона:

$$H = - \sum_i^N p_i \log p_i, \quad (2.25)$$

где  $p_i$  — вероятность встречаемости символа  $i$  в коде, содержащем  $N$  символов. В дальнейшем им было показано, что при весьма разумных предположениях данная энтропия является очень полезной характеристикой состояния неопределенности системы. В свою очередь изменение энтропии  $\Delta H$  является мерой информации [60].

Энтропия — мера неопределенности некоторой ситуации. Можно также назвать ее мерой рассеяния и в этом смысле она подобна дисперсии. Но если дисперсия является адекватной мерой рассеяния лишь для специальных распределений вероятностей случайных величин (а именно — для двухмоментных распределений, в частности, для гауссова распределения), то энтропия не зависит от типа распределения.

С другой стороны, энтропия замечательна еще и тем, что кроме универсальности также является аддитивной характеристикой. То есть если необходимо рассчитать суммарную энтропию двух подсистем, то она будет равна сумме энтропий каждой из них:  $H = H_1 + H_2$ . То же свойство, соответственно, будет справедливо и для информации.

В теории информации в формуле для энтропии обычно используют двоичные логарифмы, тогда (энтропия и информация) измеряется в битах.

Это удобно тем, что выбор между двумя равновероятными уровнями  $p_i$  (как в двоичном сигнале) характеризуется неопределенностью 1 бит. В популярной литературе иногда пользуются десятичными логарифмами, и единицей энтропии является *дит*. В физике удобнее пользоваться натуральными логарифмами и единицей энтропии является *нат*. Поскольку в дальнейшем наш подход существенно физический, мы также используем натуральные логарифмы. Выбор основания – лишь вопрос масштаба, в любом случае энтропия безразмерна.

Рассмотрим методику расчета информационной энтропии  $H$  как меры неопределенности динамической системы. Для этого исследуем некоторый физический параметр  $X$  динамической системы, меняющийся во времени или в пространстве. С помощью измерительных приборов зафиксируем данный физический параметр в виде ряда дискретных значений  $X_j$  (см. рисунок 2.7), длиной  $M$  отсчетов ( $j = 1 \dots M$ ).

Чтобы рассчитать  $H(X)$  область значений ряда  $X_j$  разбивается на несколько диапазонов (квантов) размером  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{N},$$

где  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения ряда  $X_j$ ;  $N$  – количество квантов разбиения.

Затем подсчитывается число  $m_i$  заполнения каждого  $i$ -того диапазона ( $i = 1 \dots N$ ), то есть количество отсчетов ряда  $X_j$  (на рисунке 2.7 показаны точками), попавших внутрь диапазона. В результате мы получаем распределение вероятностей:

$$p_i = \frac{m_i}{M},$$

которое подставляем в формулу (2.21) и получаем конечное выражение информационной энтропии для произвольного  $N$ :

$$H(X, N) = - \sum_i^N \frac{m_i}{M} \ln \frac{m_i}{M}.$$

Причем в этом случае информационная энтропия  $H$  зависит как от вариации  $X$ , так и от количества  $N$  диапазонов, на которое данная вариация будет разбита.

Обычно количество участков квантования выбирают равной разрешающей способности измерительного прибора:

$$N = \frac{1}{\delta_X},$$

где  $\delta_X$  – относительная погрешность измерения величины  $X$  (в этом случае  $\varepsilon = \delta_X$ ).

Но в большинстве случаев более корректным методом определения энтропии будет нахождение предела:

$$H(X) = \lim_{N \rightarrow \infty} - \sum_i^N \frac{m_i}{M} \ln \frac{m_i}{M}. \quad (2.26)$$

Практические исследования показали, что при измерении физической величины цифровыми приборами значение предела (2.26) достаточно быстро сходится (см. рисунок 2.9) при  $N < 1000$  для средств измерения, использующих 12-ти разрядное аналого-цифровое преобразование (АЦП), и при  $N < 120$  для 8-ми разрядного АЦП.

Таким образом, получаем следующий алгоритм вычисления информационной энтропии Шеннона (см. рисунок 2.8):

1. Зададим погрешность вычисления энтропии  $\xi = 10^{-10}$ .
2. Зададим первоначальное (минимальное) значение количества диапазонов разбиения  $N_{min} = 3$ .
3. Зададим максимально возможное количество диапазонов разбиения  $N_{max} = 2^{12} = 4096$ .
4. Введем промежуточную переменную:  $H_0 = 0$ .

5. Сформируем цикл для  $N$  от  $N_{min}$  до  $N_{max}$ :
6. Вычислим ширину диапазона разбиения  $\varepsilon = (X_{max} - X_{min})/N$ .
7. Подсчитаем число  $m_i$  точек, попавших внутрь каждого диапазона:

$$m_i = \sum_{j=1}^m F(X_j - X_{min}, \varepsilon, i), \text{ где}$$

$$F(X, \varepsilon, i) = \begin{cases} 1, & \text{если } \varepsilon(i-1) \leq X < \varepsilon i \\ 0, & \text{если } X < \varepsilon(i-1) \text{ или } X \geq \varepsilon i \end{cases}$$

8. Рассчитаем значение информационной энтропии для текущего

$$N: \quad H = - \sum_i^N \frac{m_i}{M} \ln \frac{m_i}{M}$$

9. Если прирост энтропии на данной итерации цикла меньше погрешности энтропии:

$$|H - H_0| < \xi,$$

то получаем готовый результат:  $H(X) = H$  и останавливаем программу.

10. Иначе запоминаем результат текущей итерации:  $H_0 = H$ .

11. Проверим условие конца цикла: если  $N < N_{max}$ , то увеличиваем значение  $N$  на 1 и переходим на шаг 6.

12. Иначе выдаем сообщение **«Требуемая точность вычисления информационной энтропии недостижима»** и останавливаем программу.

При внимательном анализе блок-схемы, приведенной на рисунке 2.8, можно увидеть возможность оптимизации данного алгоритма. А именно: если исходную вариацию  $X$  предварительно отсортировать, так чтобы для любых  $j$  выполнялось условие  $X_j \leq X_{j+1}$ , то вложенные циклы 2 и 3 можно заменить одним, как показано на рисунке 2.10.

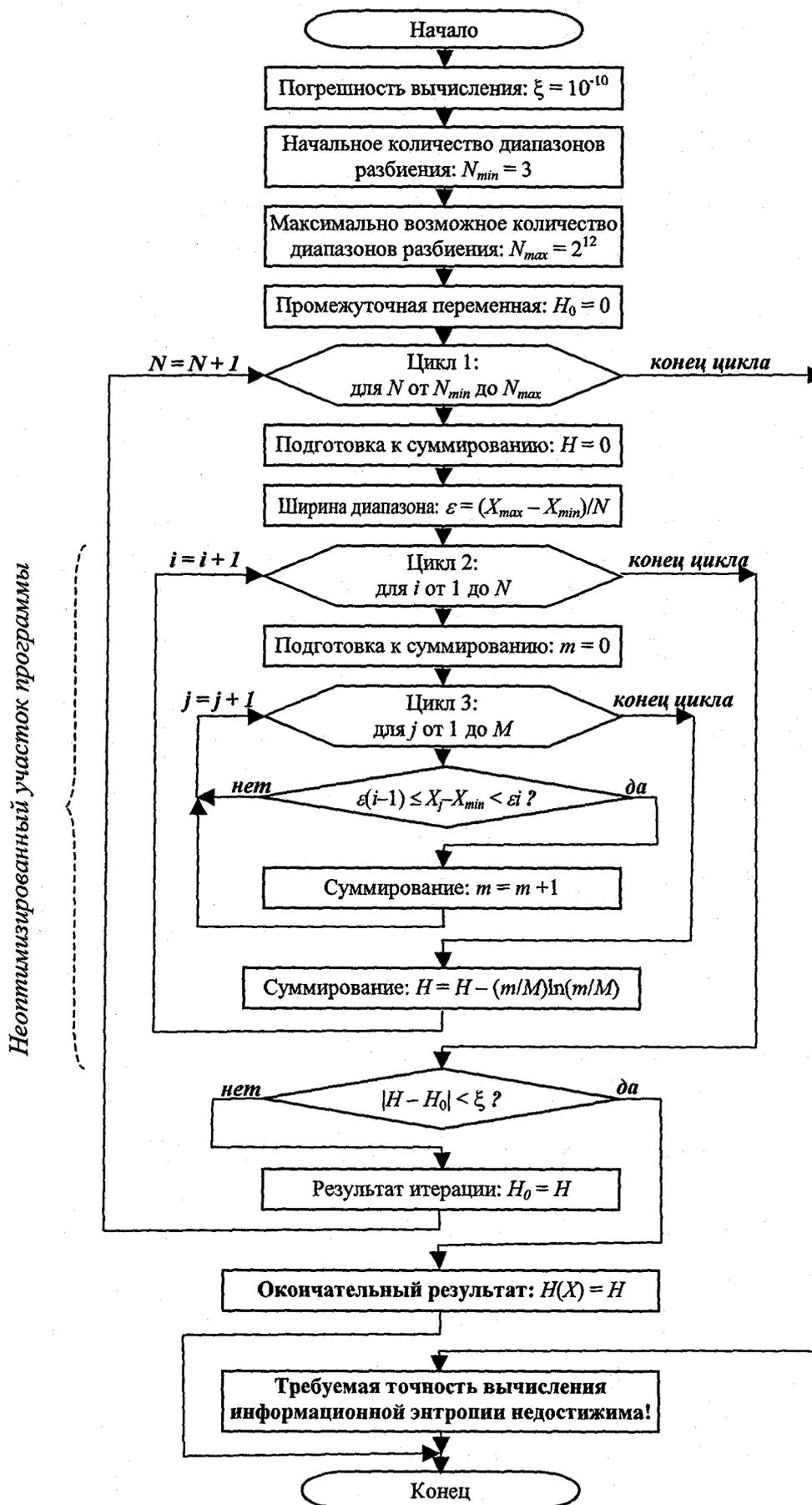


Рисунок 2.8. Блок-схема расчета информационной энтропии

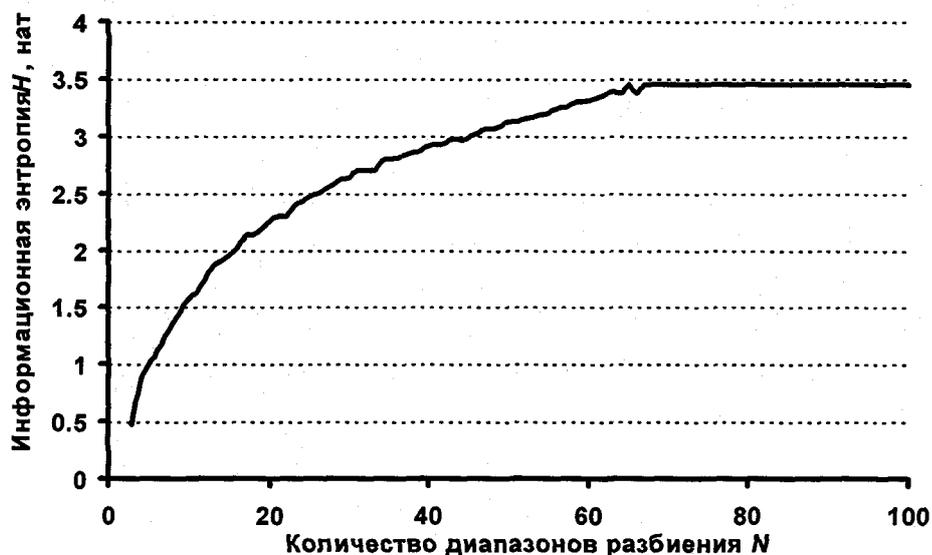


Рисунок 2.9. График изменения вычисленного значения информационной энтропии  $H(X,N)$  исследуемого профиля поверхности от количества диапазонов разбиения  $N$ . Профилограмма получена с помощью 8-разрядного цифрового профилографа

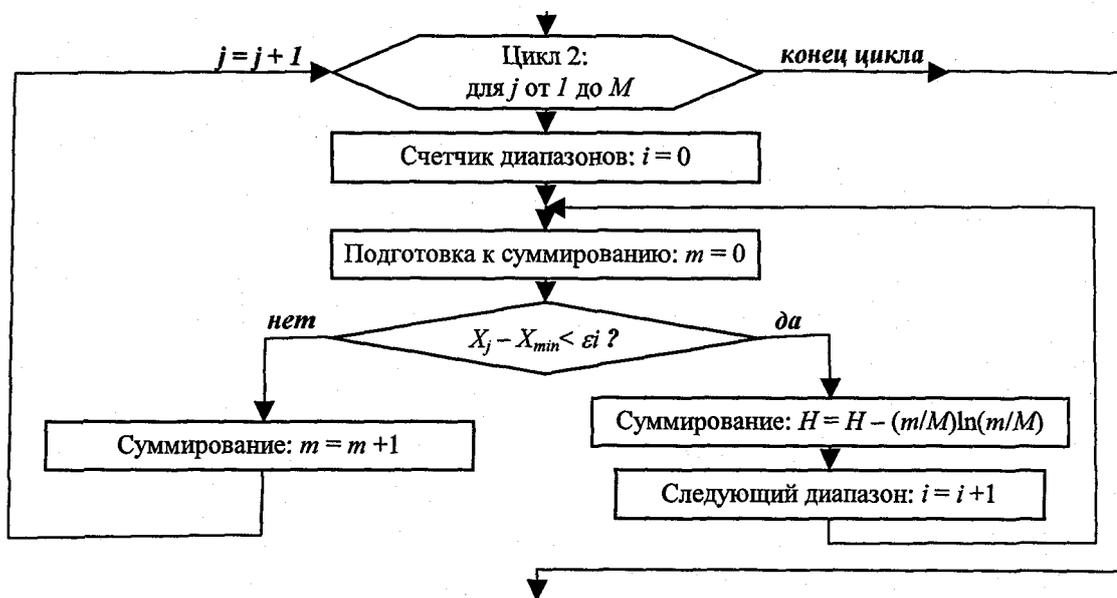


Рисунок 2.10. Оптимизированный участок алгоритма расчета информационной энтропии

То есть на этом участке программы вместо  $N \times M$  операций сравнения вполне достаточно будет использовать всего  $M$  таких операций. Подобная оптимизация дает значительный выигрыш во времени вычисления информационной энтропии для больших массивов экспериментальных данных.

### 2.3.8. Алгоритм самоподобия временного ряда

Идея алгоритма предложена аспирантом кафедры «Технология машиностроения» Серым С.В. и основана на анализе самоподобия временного ряда. То есть высказывается предположение, что если на временном ряде в некотором его интервале находятся подобные между собой участки, и найденные участки покрывают весь исследуемый интервал, то его можно считать хаотичным в такой степени, насколько велика погрешность подобия данных участков.

Если погрешность мала и соответственно данный интервал ряда в большей степени самоподобен – то на этом интервале временная последовательность менее хаотична. Если же в результате работы программы не были найдены подобные участки или же найдены участки с большой погрешностью – то делается вывод, что ряд на этих участках хаотичен.

Таким образом, по изменению найденных значений погрешности самоподобия в разных участках временного ряда можно судить о его хаотичности в любой области.

Для поиска подобных участков и их коэффициентов самоподобия применяется метод IFS- преобразований, широко используемый при построении фрактальных множеств. Таким образом, метод IFS – преобразований позволил ввести новую характеристику временного ряда – погрешность самоподобия ( $\Delta$ ) – термин, который характеризует распределение меры самоподобия по временному ряду в каждом его участке.

В этом методе для каждого, сколь угодно малого участка временного ряда, перебираются все остальные, большие участки этого же ряда, и находится наиболее подобный ему больший участок. Понятно, что абсолютного подобия не будет – то есть будет наблюдаться различие в исходном и найденном участках. Это различие назовем погрешностью подобия исходного участка найденному участку. Значение погрешности подобия присвоим исследуемому участку и перейдем к поиску погрешности подобия для следующего участка. В конечном итоге для каждого участка временного ряда мы найдем минимальную погрешность подобия какому-либо другому участку на этом же ряде.

Таким образом, после проведения такого усовершенствованного алгоритма IFS – преобразований над временным рядом, получим распределение на временном ряде новой характеристики – погрешности самоподобия. И эта характеристика показывает, насколько ряд самоподобен в каждом своем участке. Этот факт позволяет предположить, что погрешность самоподобия показывает распределение хаотичности по временному ряду.

То есть, если значение погрешности самоподобия в какой-либо части временного ряда велико, то значит, для этого участка не нашлось на всем временном ряде достаточно подобного ему участка и значит временной ряд в этом месте более хаотичен, чем какой-либо другой участок ряда, у которого погрешность самоподобия меньше.

На первом этапе работы программы первоначально задается некоторое эталонное значение погрешности, например 10 %. Затем запускается рекурсивный процесс поиска областей, коэффициент подобия которых меньше значения заданной погрешности. В процессе работы программы происходит поиск подобия и анализ погрешности от больших участков к меньшим. Если на большем участке получены неудовлетворительные результаты (погрешность подобия которых больше заданной изначально), то

он разбивается на более мелкие и процесс рекурсивно повторяется, пока не будут найдены участки с погрешностью, меньше эталонной. В результате работы программы исследуемые временные ряды разбиваются на участки разного размера, значение погрешности самоподобия на каждом из которых не более эталонной.

### **Описание алгоритма программы.**

Практически, алгоритм поиска подобных областей, вычисления коэффициента подобия реализован в виде рекурсивной функции, в которой первоначально ряд разбивается на два интервала; на них производится поиск погрешности самоподобия, затем полученные значения погрешности сравниваются с эталонным значением.

Если полученная погрешность меньше эталонной, то делается вывод, что данный участок самоподобен в достаточной степени. На этом поиск подобных областей и разбиение на более мелкие участки для данного интервала прекращается.

Иначе, если удовлетворительного значения погрешности не получено, интервал разбивается на более мелкие участки и для каждого из этих участков вызывается первоначальная функция. Таким образом, процесс рекурсивно повторяется, пока весь ряд не будет проанализирован на предмет наличия уже более мелких интервалов с заданной погрешностью.

Блок - схема алгоритма программы представлена на рисунке 2.11.

Входными параметрами функции REC являются:

- 1) Массив с элементами временного ряда произвольного размера, для которого нужно найти подобный участок в исходном временном ряде.
- 2) Уровень рекурсивной вложенности – нужен для остановки рекурсивного процесса на заданной глубине.

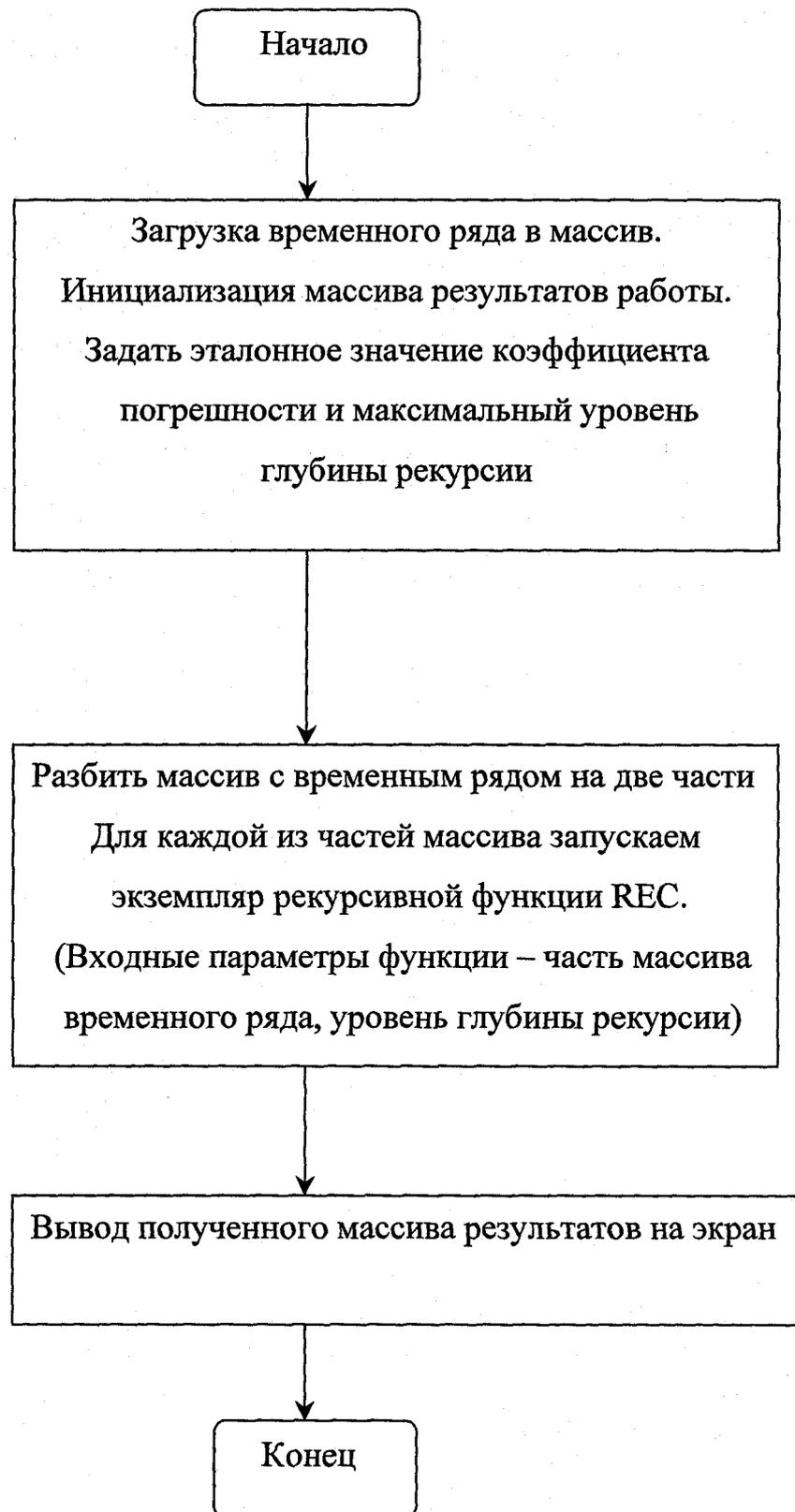


Рисунок 2.11. Блок – схема алгоритма программы

Кроме того, в программе заведено несколько массивов и переменных:

- массив, содержащий временной ряд непосредственно;
- массив результатов работы программы, в котором на заданных промежутках находятся элементы со значениями, соответствующими величине и уровню погрешности аналогичных участков на временном ряде;
- временные массивы для хранения промежуточной информации и анализируемых в данный момент участков временного ряда;
- переменная, характеризующая уровень вложенности рекурсии (при запуске очередного экземпляра функции увеличивается и передается ей как параметр).

Алгоритм работы функции REC представлен на рисунке 2.12.

#### 2.4. Выводы

1. Разработан стенд, программное и аппаратное обеспечение для измерения параметра шероховатости  $R_a$ , характеризующего качество обработанной поверхности.

2. Показана возможность применения для оценки качества обработанной поверхности новых информационных критериев: фрактальной размерности, информационной энтропии, погрешности самоподобия.

3. Разработаны алгоритмы оценки фрактальной хаусдорфовой ( $D_0$ ) размерности, информационной энтропии ( $H$ ), погрешности самоподобия ( $\Delta$ ).



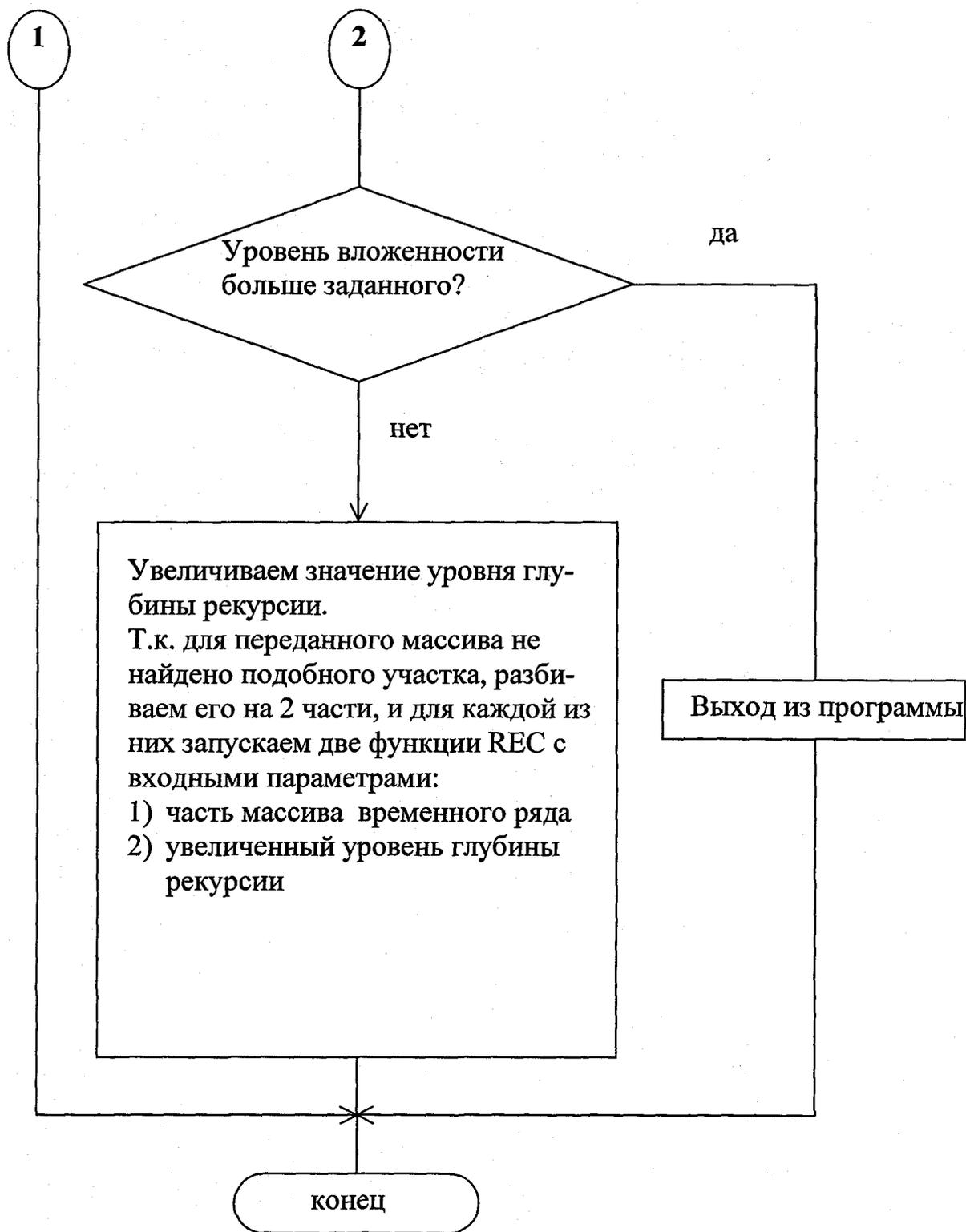


Рисунок 2.12. Алгоритм работы функции REC

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ОБРАБОТКИ НА ШЕРОХОВАТОСТЬ ПОВЕРХНОСТИ**

Резание является сложным физическим процессом, при котором возникают упругие и пластические деформации. Этот процесс сопровождается трением, тепловыделением, наростообразованием, усадкой стружки, наклепом обработанной поверхности и изнашиванием инструмента. Знание физической сущности резания и закономерности явлений, которыми он сопровождается, позволяет рационально управлять этим процессом и качеством обработанной поверхности. Задача повышения качества обработанной поверхности обуславливает необходимость разработки новых критериев, которые позволяли бы диагностировать шероховатость обработанной поверхности в процессе обработки.

#### **3.1. Исследование наростообразования при резании**

В работах [24, 31, 56, 63, 75, 109] отмечается большое влияние нароста на параметры шероховатости обработанной поверхности. Поэтому рассмотрим механизмы формообразования обработанной поверхности, образования нароста и его влияние на качество обработанной поверхности более подробно.

Взаимосвязь различных характеристик состояния поверхностного слоя исследовали при резании углеродистых сталей 10, 45, У8 и титанового сплава 3М. Режимы резания: скорость  $V = 5 \div 300$  м/мин, подача  $s = 0,09 \div 0,43$  мм/об, глубина резания  $t = 0,5 \div 2$  мм. Использовали инструмент с пластинами из сплавов ВК8, Т15К6, Т5К10 и с покрытием (ВК8 + TiC + TiCN + TiN).

При свободном резании дисков диаметром 100 – 150 мм исследовали высоту нароста  $H$ , высоту неровностей  $R_a$ , а также запасенную энергию деформации  $\Delta U_d^3$  (скрытую энергию деформирования) и плотность дислокаций  $\rho$ , которые рассчитывали по результатам измерения микротвердости.

В работах /50, 94/ параметры  $\rho$  (плотность дислокаций) и  $\Delta U_d^3$  (запасенная энергия деформирования) используют в качестве критериев комплексной оценки физико-механического состояния поверхностного слоя детали обработанной резанием. Скрытую энергию деформирования в поверхностном слое рассчитывали по формуле (3.1), предложенной В.К. Старковым /94/. Значение скрытой энергии деформирования представляет собой плотность энергии, накопленной поверхностным слоем в результате пластической деформации при резании, и является энергией дислокаций:

$$\Delta U_d^3 = \frac{Gb^2}{4\pi(1-\mu)} \cdot \frac{\rho_0 H}{2+gH} \cdot \ln \frac{R}{b} \left\{ 1 - \frac{1}{2+gH} [1 - e^{-(2+gH)}] \right\}, \quad (3.1)$$

$$\text{где } R = \left( \frac{\rho_0}{2+gH} \left\{ 1 - \frac{1}{2+gH} [1 - eH - (2+gH)] \right\} \right)^{\frac{1}{2}},$$

$G$  – модуль сдвига,  $b$  – вектор Бюргерса,  $H$  – глубина упрочнения,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $\rho$  – плотность дислокаций.

Глубина упрочнения определялась по формуле  $H = 1/g \ln \sigma_y/\sigma_{0,2}$ , где  $g = 0,0848 + 6,597\delta$ ;  $\delta = 6,029 \cdot 10^7 \cdot e^{-5,69d}$ ,  $d$  – диаметр отпечатка.

В работе /50/ получены зависимости для расчета начального уровня упругой энергии в микрообъеме и твердом теле. Эти формулы взаимосвязаны:

$$U_{д0}^V = 30 \cdot 10^{-6} HV_0; \quad U_{д0} = 85 \cdot 10^{-5} HV_0.$$

Для определения начального (исходного) уровня плотности дислокаций  $\rho_0$  в работе /50/ получена зависимость:

$$\rho_0 = 1,156 \cdot 10^{-3} HV_0^{2,957}. \quad (3.2)$$

Плотность дислокаций на обработанной поверхности определялась через микротвердость обработанного  $HV$  и исходного материала  $HV_0$ :

$$\rho = \frac{2\pi^2 c^2 (1-\mu)^2}{G^2 b^2 (1-\mu/2)^2} (HV^2 - HV_0^2),$$

где  $c = 0,1$ ;  $\mu = 0,33$ ;  $G$  – модуль сдвига.

В.К. Старков отмечает, что существует корреляция между скрытой энергией и нестабильностью глубины упрочнения поверхностного слоя детали, обработанной точением. Снижение уровня запасенной энергии сопровождается и уменьшением шероховатости обработанной поверхности. Следовательно, скрытая энергия поверхностного слоя является критерием, минимизация которого обеспечивает улучшение качества обработанной поверхности.

Обработанную поверхность и корни стружек исследовали на оптическом и растровом микроскопах. Микротвердость измерялась прибором ПМТ – 3. На рисунке 3.1 показаны зависимости высоты нароста  $H$ , длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $C$ , длины подошвы нароста  $L$  от скорости резания. На рисунке 3.2 показано влияние скорости резания на высоту неровностей обработанной поверхности  $R_z$ , ее уширение  $b$ , микротвердость  $H_\mu$  и запасенную скрытую энергию деформирования  $\Delta U_d^3$ .

Проведенный анализ дает основание считать скрытую энергию деформирования поверхностного слоя детали энергетическим критерием качества обработки.

Анализ результатов исследований (рисунки 3.1 и 3.2) показывает, что при обработке углеродистых сталей происходит согласованное изменение указанных параметров. Причем при резании стали 10 параметры  $H$ ,  $C$ ,  $L$ ,  $R_z$ ,  $H_\mu$  и  $\Delta U_d^3$  имеют наибольшие значения при  $V = 30$  м/мин.

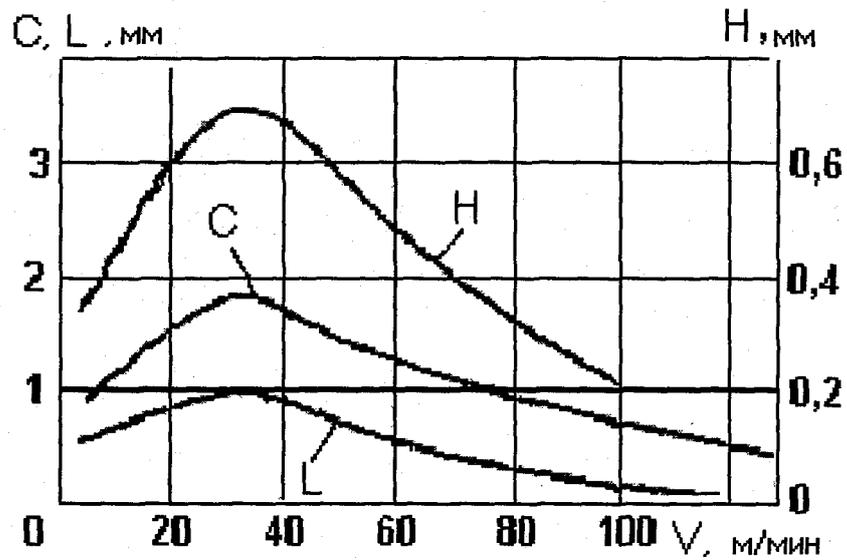
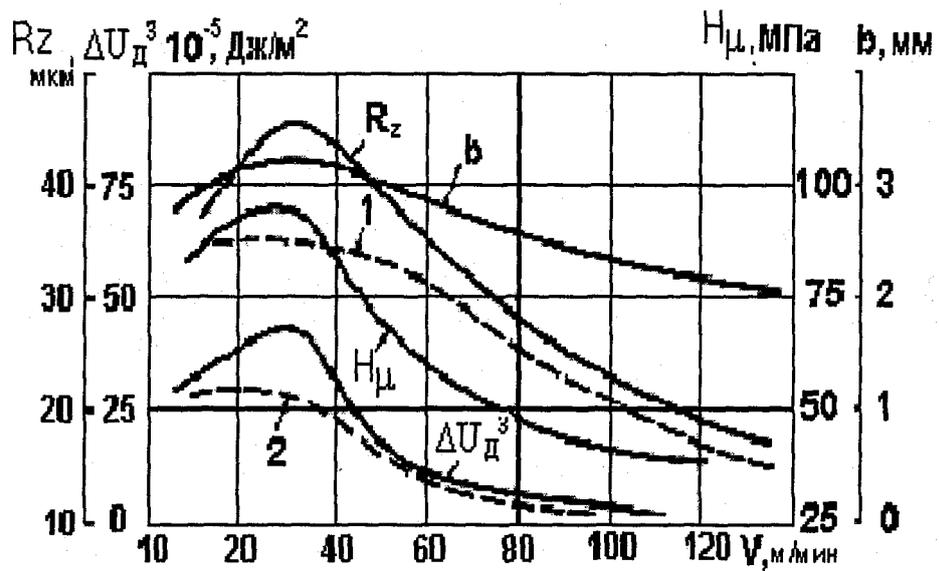


Рисунок 3.1. Зависимость параметров резания от скорости резания при обработке стали 10



1 и 2 -  $R_z$  и  $\Delta U$  при использовании покрытия ( $TiC + TiO_2$ )

Рисунок 3.2. Зависимость параметров поверхности от скорости резания при обработке стали 10

Исследования наростообразования [24, 31] показывают, что высота нароста при резании углеродистых сталей существенно характеризуется содержанием в них углерода. В частности, высота нароста, длина его подошвы при резании высокоуглеродистых сталей меньше, чем при обработке низкоуглеродистых сталей. На рисунке 3.3 показана микрофотография шлифа корня стружки с наростом при обработке стали 10.

На рисунке 3.4 приведена микрофотография подошвы нароста, полученного при резании стали 10 при  $V = 20$  м/мин. При металлографическом исследовании [31] выявляется завихренная структура. Наличие вихревых структур свидетельствует о высокой степени деформации  $\epsilon$  прирезцовых слоев вследствие больших значений нормальных напряжений  $\sigma_N$  у режущего лезвия инструмента.

Анализ исследований и литературные данные [23, 34] показывают, что высота нароста при резании углеродистых сталей определяется содержанием углерода и температурой плавления: чем выше температура плавления стали, тем меньше высота нароста при резании. Степень упрочнения нароста зависит от модуля упругости  $E$ . Установлено, что чем больше  $E$ , тем выше степень упрочнения и твердость нароста. Рост (развитие) нароста начинается с образования ядра (рисунок 3.5), а затем формируется его клинообразная форма. Разрушение вершины нароста происходит как вследствие процесса рекристаллизации (рисунок 3.6), так и из-за вибрационных явлений.

Вихревой механизм образования нароста и в целом ротационные моды деформации обуславливают высокие значения энергии  $\Delta U_D^3$ , степени  $\eta$  и глубины  $h$  наклепа обработанной поверхности.

Вихревой характер движения структурных элементов в окрестностях режущего лезвия способствует также вырыву зерен с поверхности и анизотропии шероховатости.

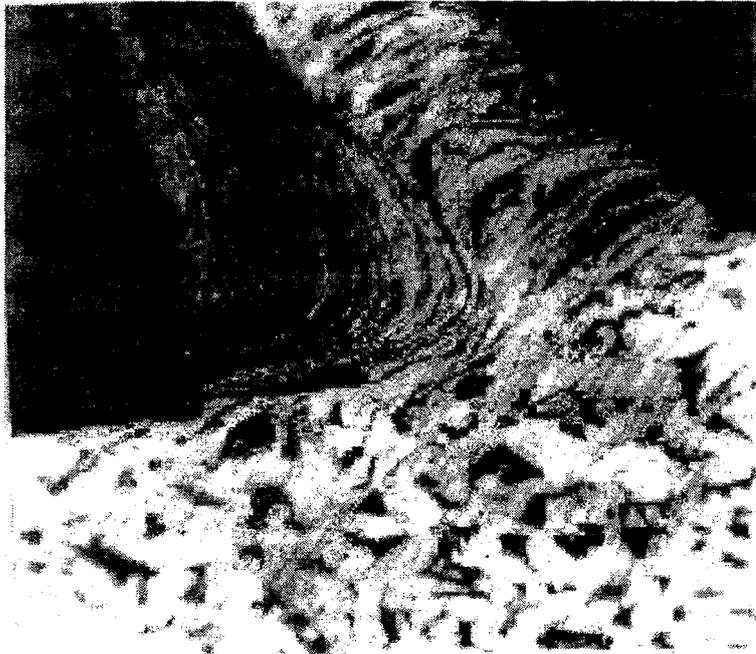


Рисунок 3.3. Микрофотография корня стружки при обработке стали 10 ( $\times 350$ ).  $V = 30$  м/мин /39/

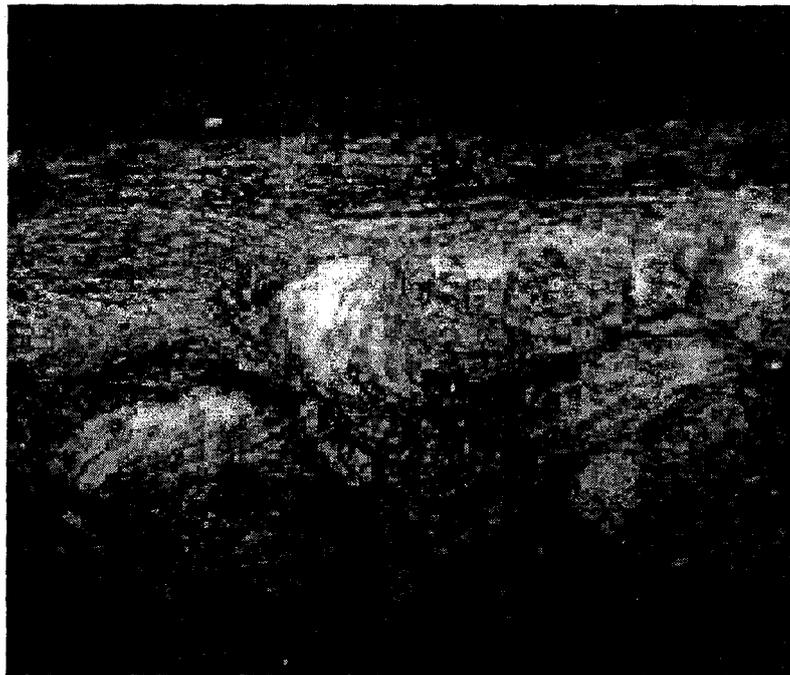


Рисунок 3.4. Микроструктура подошвы нароста при резании стали 10 ( $\times 240$ ).  $V = 40$  м/мин

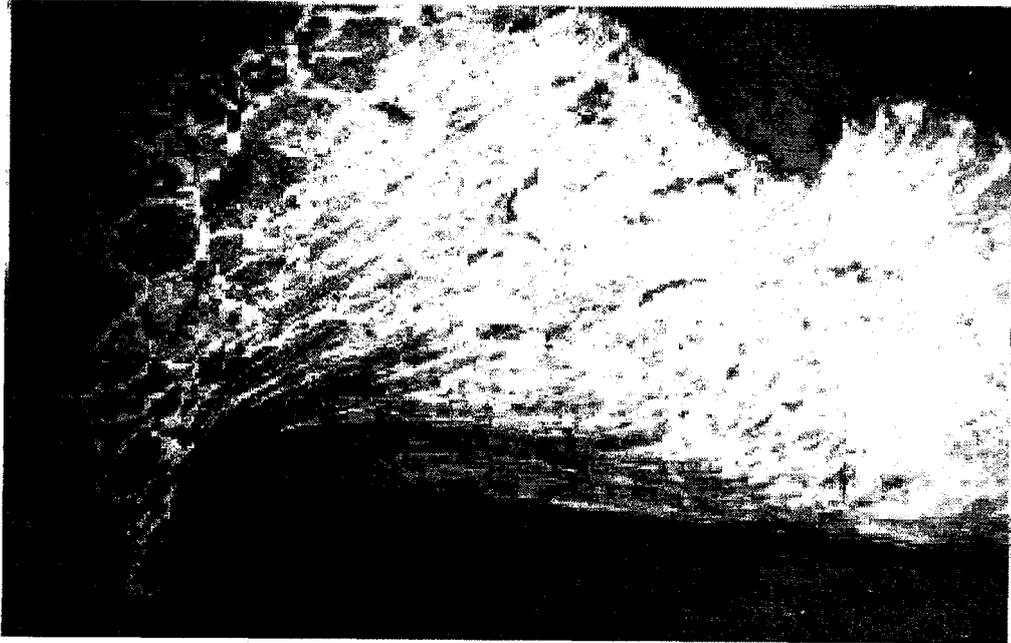


Рисунок 3.5. Образование ядра нароста



Рисунок 3.6. Рекристаллизация деформированного металла в вершине нароста. Сталь 3. ( $\times 3000$ )

Модуль упругости, температура  $T_{пл}$  плавления сталей и параметры процесса резания при обработке на скоростях, где наблюдается интенсивное наростообразование ( $S = 0,11$  мм/об,  $t = 1$  мм), приведены ниже:

Материал	Сталь10	Сталь40	СтальУ8
$E_{573\text{ К}}$ , МПа	$14,4 \cdot 10^4$	$20 \cdot 10^4$	$21,1 \cdot 10^4$
$R_z$ , мкм	55	44	30
$H$ , мм	0,65	0,52	0,38
$T_{пл}$ , К	1773	1663	1573
$\Delta U$ , Дж/м <sup>2</sup>	$70 \cdot 10^{-5}$	$100,8 \cdot 10^{-5}$	$125 \cdot 10^{-5}$

По значениям модуля упругости  $E$  материалов можно прогнозировать устойчивость нароста, степень наклепа нароста обработанной поверхности, ее шероховатость. Такая связь обусловлена тем, что деформационное упрочнение металлов с ОЦК- решеткой после достижения предела текучести  $\sigma_T$  определяется его пределом и модулем упругости /10/. Другими словами уровень модуля упругости  $E$  обуславливает тип дислокационной структуры, формирующейся в зоне стружкообразования с ростом степени деформации, а следовательно, сопротивление пластической деформации. С ростом температуры /23/ уровень модуля упругости  $E$  уменьшается, поэтому с увеличением скорости резания зона деформации ниже линии среза, параметры  $\eta$ ,  $h$  и  $\Delta U_d^3$  также уменьшаются. Это объясняет малую степень и глубину наклепа, а также шероховатость обработанной поверхности при резании титановых сплавов, имеющих небольшой модуль упругости ( $E = 11 \cdot 10^4$  МПа).

Изменение механизма деформации срезаемого слоя, повышение пластичности деформируемых объемов в результате фрагментации зерен и изменение напряженного состояния в зоне стружкообразования при обработке сталей с ростом скорости резания  $V$  обеспечивает развитие заторможенных слоев стружки и образование нароста с клиновидной формой

(рисунок 3.3). Его формирование следует рассматривать как результат самоорганизации (приспосабливаемости) системы резания к условиям обработки. В результате образования нароста снижается степень деформации  $\epsilon$  срезаемого слоя, увеличивается угол сдвига  $\beta_1$  и производство энтропии  $S$ .

Вихревая мода деформации обеспечивает появление новых степеней свободы и каналов для интенсификации аномального массопереноса как в прирезцовом слое стружки вследствие его аморфизации, так и в теле нароста при его взаимодействии с внешней средой – кислородом воздуха.

Образующиеся оксиды в теле нароста вследствие взаимодействия с кислородом воздуха упрочняют его, повышают его твердость и устойчивость. Благодаря высокой твердости, нарост выполняет функции режущего лезвия инструмента, увеличивая его передний угол. В результате уменьшаются степень деформации  $\epsilon$  срезаемого слоя и силы резания.

Температурная зависимость внутреннего трения в сталях [23] объясняет причины максимума нароста при температуре резания  $\theta = 573$  К. При указанной температуре резко возрастает подвижность углерода и дислокаций, о чем свидетельствует релаксационный пик, что вызывает увеличение пластичности металла в срезаемом слое. В результате значение нароста увеличивается. Дальнейшее уменьшение нароста с ростом скорости резания  $V$  обусловлено снижением степени деформации  $\epsilon$ , а также развитием рекристаллизационных процессов в вершине нароста (рисунок 3.6).

Влияние режимов резания на высоту нароста проявляется через степень деформации  $\epsilon$  срезаемого слоя. В этой связи высота нароста с ростом скорости резания будет определяться как степенью упрочнения его тела, так и температурой резания, вследствие рекристаллизационных процессов. При резании стали У8 температура резания выше, а температура рекристаллизации ниже, чем при резании малоуглеродистой стали 10. Поэтому

высота нароста при обработке этой стали меньше, чем при резании стали 10. С ростом скорости резания  $V$  характер деформации в зоне стружкообразования приближается к адиабатическому и длина пластического контакта резко сокращается, что уменьшает возможность затормаживания прирезцовых слоев и развитие нароста. В результате шероховатость  $R_a$  уменьшается.

Полученные результаты комплексных исследований позволяют изложить точку зрения и на природу образования нароста. Его формирование начинается в месте первичного контакта стружки с инструментом с образования ядра нароста (рисунок 3.5). Дальнейший его рост осуществляется путем послойного затормаживания уже окисленных слоев, круто поворачивающихся еще до режущего лезвия. Упрочнение прирезцовых слоев стружки происходит у режущего лезвия, где нормальные и гидростатические напряжения сжатия максимальны. Затормаживание прирезцовых слоев стружки и образование нароста с повышением скорости резания происходит с высокой скоростью (аналогично удару), что вызывает мгновенный локальный рост температуры, которая повышает температуру аустенизации стали. Именно поэтому, с ростом скорости резания, на подошве нароста фиксируются структуры отпуска стали. Фазовые переходы способствуют повышению микротвердости подошвы нароста, т.е. его упрочнению.

Поведение металлов в аморфном состоянии рассмотрено в работах /39, 42/ и близко к течению вязкой жидкости. При низких скоростях резания это течение является ламинарным – перемешивание между соседними пластическими слоями отсутствует. С увеличением скорости резания  $V > V_{кр}$  такое течение становится неустойчивым – в результате случайных возмущений могут возникать локальные мелкомасштабные вихри вследствие затормаживания локальных объемов обрабатываемого материала, а также крупномасштабные вихри, в которых гладкие квазипараллельные траекто-

рии движения пластических частиц сменяются неустановившимися движениями по сложным траекториям.

Таким образом, в приконтактных слоях стружки нарушается ламинарный характер пластического течения, в модах пластического течения появляется вращательная компонента и возникают вихревые структуры пластического движения, т.е. реализуется ротационный массоперенос обрабатываемого материала на инструмент.

Данные локальные области образуются при критических скоростях пластической деформации ( $V_{кр}$ ), растут автоускоренно с увеличением скорости сдвига и неоднородности напряжения на контакте, а также релаксируют за несколько микросекунд. Систему таких областей следует рассматривать динамической диссипативной структурой. Экспериментально система таких областей фиксируется после вывода инструмента из зоны резания (рисунок 3.7).

На рисунке 3.8 приведена модель квазижидкого слоя в прирезцовом слое стружки. Показаны мелкомасштабные (локальные) вихревые структуры – налипы и крупномасштабные, располагающиеся на некотором удалении от границы раздела стружка – инструмент и способствующие развитию нароста в клиновидное тело.

В целом, сформировавшийся развитый нарост с клиновидной формой (рисунок 3.3) следует рассматривать уединенной диссипативной структурой, как результат самоорганизации процессов пластического течения.

Таким образом, с позиций синергетики /103/ образование нароста есть результат самоорганизации в системе трения вследствие нарушения в ней термодинамического равновесия при резании и образования диссипативных структур.

Как диссипативная структура нарост обладает определенной устойчивостью, т.е. «временем жизни».

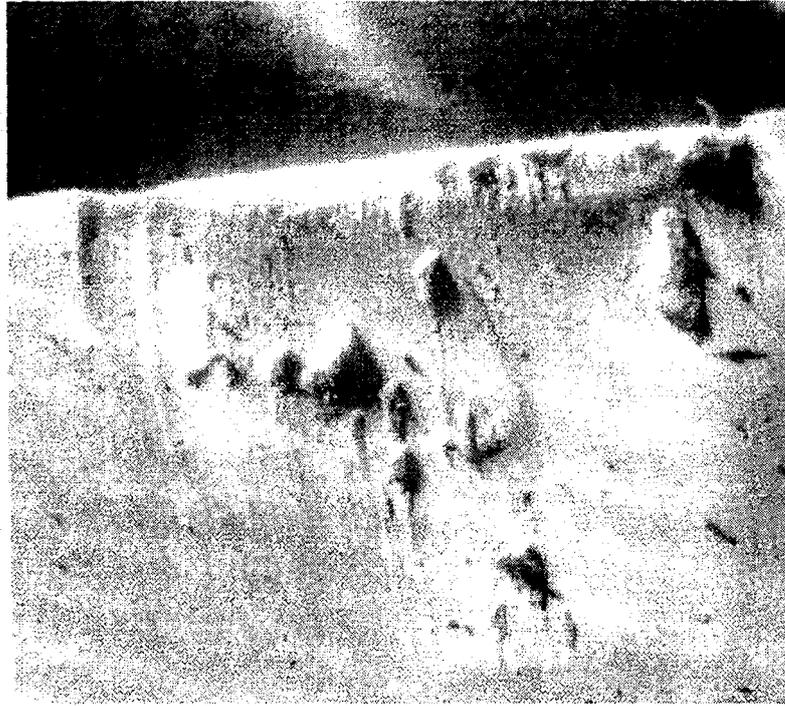


Рисунок 3.7. Частицы металла приварившиеся после сдвига нароста к передней поверхности инструмента ВК8 ( $\times 60$ )

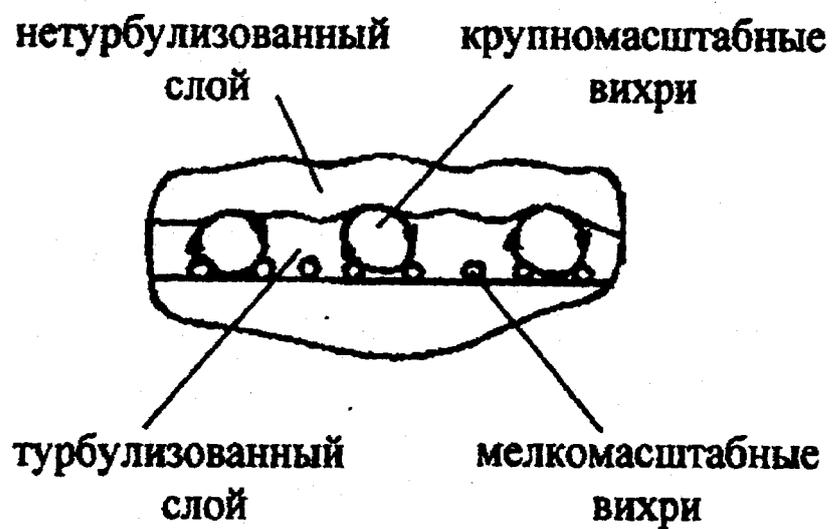


Рисунок 3.8. Модель квазижидкого слоя в прирезцовых слоях стружки. Иерархия вихрей

Низкая температура рекристаллизации стали 10 обуславливает разупрочнение и срез вершины нароста, что наряду с вихревым движением структурных элементов ниже линии среза, способствует увеличению параметра  $R_a$  при резании.

Вихревой характер движения структурных элементов в окрестностях режущего лезвия (рисунок 3.4) облегчает доступ **внешней среды** (кислорода воздуха) в зону резания подобно насосу, что способствует уменьшению параметров  $R_a$ ,  $\Delta U_d^3$  и  $H$  по мере дальнейшего увеличения скорости резания (рисунок 3.2).

Уменьшение шероховатости, как видно на рисунке 3.2, достигается и при использовании **твердых покрытий на режущем инструменте**.

В настоящее время влияние нароста на шероховатость обработанной поверхности в основном связывается с неустойчивостью его вершины, что вызывает «чешуйчатость» поверхности /8/.

Однако на наш взгляд, на устойчивость вершины нароста влияют не только рекристаллизационные процессы, но и вибрации при резании. Вибрации способствуют расшатыванию и срезу нароста.

В разделе 4 показано, что изменение параметра шероховатости  $R_a$  от скорости резания адекватно зависимости фрактальной размерности  $D_0$  шероховатости, которая характеризует устойчивость движения упругой системы станка (УСС) и процесса формообразования, от скорости резания. В этой связи, учитывая корреляцию шероховатости  $R_a$  с коэффициентом укорочения стружки  $K_L$ , можно утверждать, что при заданной динамической характеристике УСС ( $D_0$ ), зависимость влияния вибраций на качество обработки адекватна изменению (коэффициента укорочения стружки  $K_L$  от скорости резания).

Таким образом, влияние вибраций на шероховатость обработанной поверхности  $R_a$  с ростом скорости резания можно проследить по изменению фрактальной размерности шероховатости  $D_0$  от скорости резания.

При резании технически чистых металлов (Армко-железо, титан) развитый нарост отсутствует, хотя на рабочих поверхностях инструмента обнаруживаются характерные «налипы» (рисунок 3.7). Это тесно связано с влиянием легирующих элементов как на аморфизацию железоуглеродистых сталей, так и на их способность при деформации образовывать вторичные структуры, обеспечивающие стабильное пластическое течение. Вследствие низкой э.д.у. при деформации титановых сплавов образуются такие структурные элементы как двойники, дефекты упаковки, не обеспечивающие эффективное пластическое течение и развитие нароста /39/.

Исследование наростообразования при резании позволяет заключить, что основные закономерности образования нароста, зависимость высоты нароста от скорости резания согласуются с результатами исследований других авторов /24, 31, 56, 63, 75, 109/.

### **3.2. Влияние условий обработки на шероховатость поверхности**

Качество обработанной поверхности определяется шероховатостью поверхности и состоянием материала поверхностного слоя. Состояние материала поверхностного слоя характеризуется его упрочнением (наклепом), микроструктурой, величиной и знаком остаточных напряжений. К сожалению, на данном технологическом этапе не существует эффективных способов оценки степени наклепа и величины остаточных напряжений непосредственно в процессе резания. Это делает задачу динамического управления состоянием материала поверхностного слоя неразрешимой в

рамках данной работы. Поэтому в качестве основного критерия качества обработки принята шероховатость обработанной поверхности  $R_z$ .

Вопросам влияния режимов резания на шероховатость обработанной поверхности посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных исследователей. Работы ученых /6, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 23, 38, 40, 69, 75/ были направлены на раскрытие природы образования шероховатости и установление зависимостей параметров шероховатости от режимов резания и эксплуатационных свойств деталей машин.

Исследования проводились на токарном станке 1К62. В качестве обрабатываемого материала применялись заготовки из углеродистых сталей 45 и У8, а также титанового сплава 3М диаметром  $\varnothing 60 - 100$  мм, длиной 600 мм. На заготовках создавались участки шириной 15 – 18 мм с помощью канавок шириной 5 мм. В качестве инструмента использовался токарный проходной резец со сменной четырехгранной пластиной толщиной 4 мм из твердого сплава Т15К6 с механическим креплением ( $\alpha = 5^\circ$ ,  $\gamma = 8^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$ ). Для обработки титанового сплава применяли пластины из ВК8. Шероховатость измерялась по методике, рассмотренной в главе 2.

### 3.2.1. Зависимость шероховатости от скорости резания

Значения скорости изменялись переключением частоты вращения шпинделя от 50 до 1250 мин<sup>-1</sup>, что при заданном диаметре обработки 80 мм составило  $V = 12,56 - 314$  м/мин. Подача была выбрана в соответствии с рекомендациями (см. раздел 1.3),  $S = 0,11$  мм/об. Глубина резания  $t = 1$  мм.

В результате экспериментальных исследований были получены следующие зависимости (рисунки 3.9, 3.10 и 3.15).

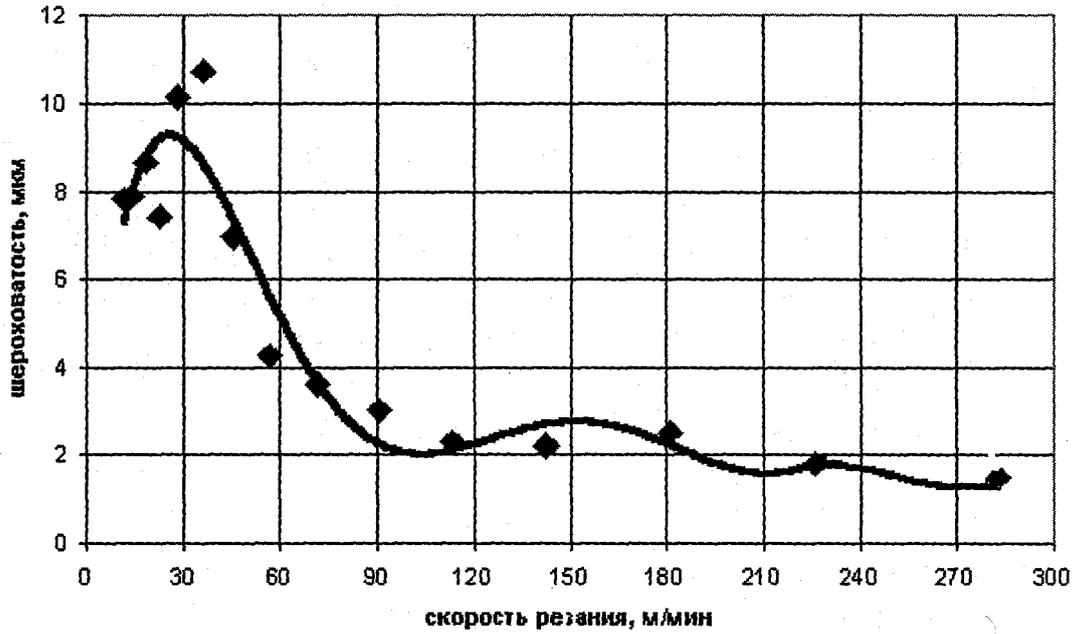


Рисунок 3.9. Зависимость шероховатости от скорости резания для стали У8

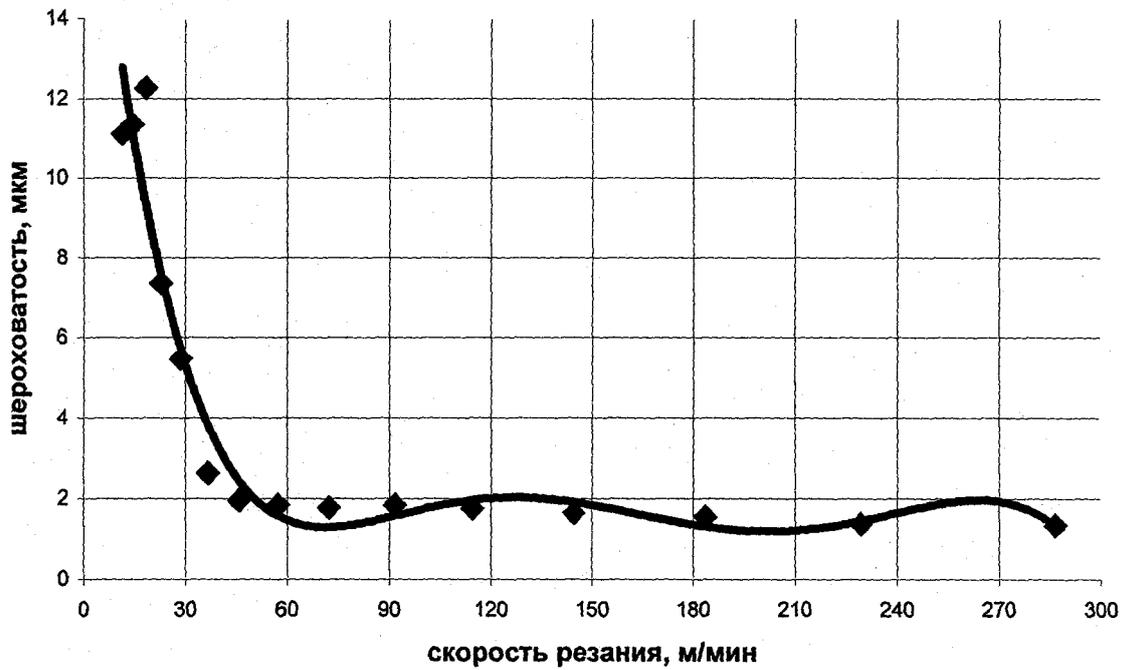


Рисунок 3.10. Зависимость шероховатости от скорости резания для стали 45

Большие значения параметра  $R_a$  при низких скоростях резания (рисунки 3.9, 3.10) объясняются явлением наростообразования. При увеличении скорости резания высота неровностей уменьшается, а затем, в области скоростей, при которых нарост уже не образуется, происходит смена типа образующейся стружки из-за изменения механизма деформации.

Поэтому зависимость шероховатости от скорости резания следует рассматривать исходя из механизмов деформирования срезаемого слоя и образования стружки при резании.

Были проведены экспериментальные и теоретические исследования закономерностей образования шероховатости обработанной поверхности в связи с кинетическими и деформационными параметрами срезаемого слоя.

Снятая стружка всегда деформирована. Внешне это проявляется через ее укорочение ( $K_L$ ) и утолщение по отношению к размерам снятого объема металла. Усадка стружки является косвенным показателем интенсивности пластического деформирования и до некоторой степени характеризует условия протекания резания: чем меньше усадка стружки ( $K_L \rightarrow 1$ ), тем меньше пластическая деформация ( $\varepsilon \rightarrow \min$ ), более благоприятны условия для стружкообразования и меньше расход мощности на обработку данной заготовки.

Коэффициент укорочения стружки  $K_L$  определяли весовым методом [75] по формуле:

$$K_L = \frac{m_{стр}}{l_{стр} \cdot S \cdot t \cdot \rho},$$

где  $m_{стр}$  – масса стружки, г;  $l_{стр}$  – длина стружки, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм;  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, г/мм<sup>3</sup>.

Массу стружки определяли взвешиванием на аналитических весах АДВ – 200М, длину стружки – накатыванием на пластилин с последующим измерением следа линейкой.

Величина относительного сдвига  $\varepsilon$  связана с  $K_L$  зависимостью:

$$\varepsilon = \frac{K_L^2 - 2K_L \sin \gamma + 1}{K_L \cos \gamma}.$$

Практически  $\varepsilon = 1 \dots 5$ . При  $K_L = 1$  относительный сдвиг  $\varepsilon \neq 0$ , а, например, при  $\gamma = 0$ ,  $\varepsilon = 2$  (рисунок 3.11).

С уменьшением переднего угла  $\gamma$  усадка стружки увеличивается. Резец с большим углом  $\gamma$  легче врезается в обрабатываемый материал и срезаемый слой будет менее деформирован (рисунок 3.11).

В ходе исследований измеряли также другую деформационную характеристику срезаемого слоя, в частности, частоту стружкообразования  $f_{\text{стр}}$  (частоту перехода деформируемого объема в стружку), которую определяли по формуле:

$$f_{\text{стр}} = \frac{1000V}{60 \cdot a_c \cdot K_L}, \quad (3.3)$$

где  $a_c$  - толщина элемента стружки,  $K_L$  - коэффициент укорочения стружки.

Размер элемента стружки  $a_c$  определяли по самой стружке с помощью лупы Бринеля.

Частота стружкообразования характеризует частоту образования элементов стружки и является деформационной характеристикой (уравнение 3.3). Физический смысл  $f_{\text{стр}}$  заключается также в том, что она характеризует продолжительность восстановления нарушенного термодинамического равновесия в системе [42], а поэтому влияет на динамические процессы при резании. Время восстановления термодинамического равновесия (время релаксации пластических деформаций) соизмеримо со временем образования элемента стружки.

На рисунке 3.12 представлены зависимости шероховатости поверхности и коэффициента укорочения стружки от скорости резания.



Рисунок 3.11. Зависимость степени деформации  $\varepsilon$  от коэффициента усадки стружки  $K_L$  [77]

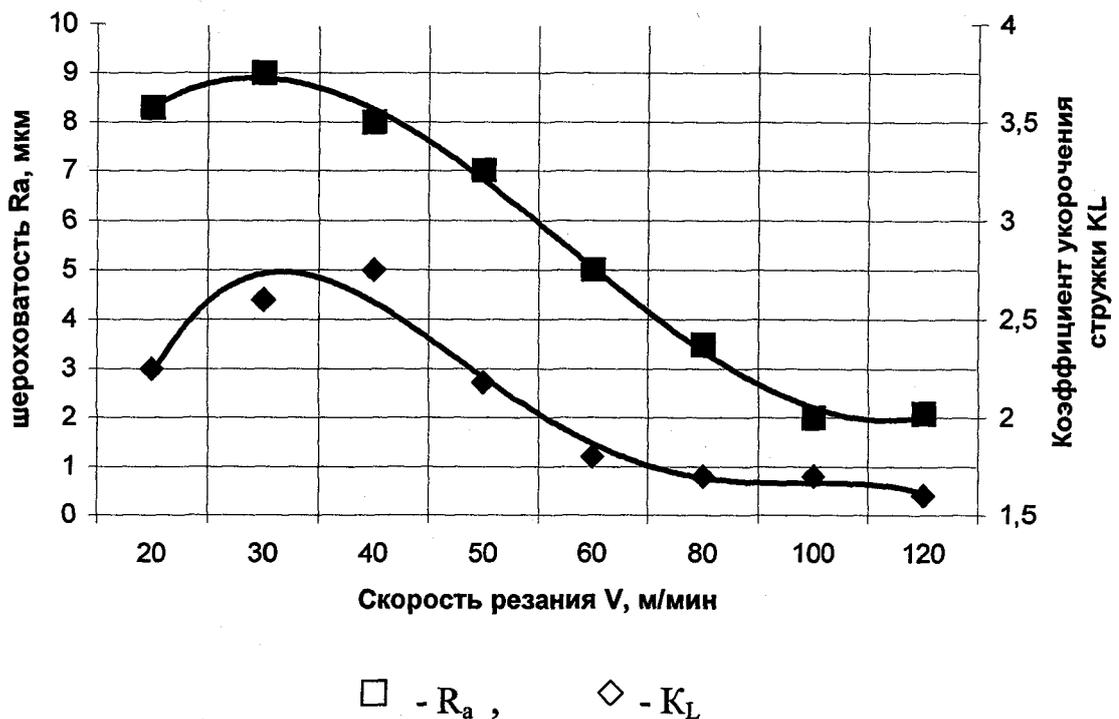


Рисунок 3.12. Зависимость шероховатости  $R_z$  и коэффициента  $K_L$  от скорости резания (сталь У8;  $S=0,11$  мм/об;  $t=1$  мм)

Из рисунка видно, что параметры  $R_Z$  и  $K_L$  с ростом скорости резания изменяются согласованно. При достижении скорости резания значения  $V_{кр} \approx 80$  м/мин, шероховатость  $R_Z$  и  $K_L$  изменяются несущественно.

На основании полученных данных построена зависимость шероховатости обработанной поверхности от частоты образования стружки, представленная на рисунке 3.13.

Получены зависимости частоты стружкообразования  $f_{стр}$ , коэффициента укорочения стружки  $K_L$ , а также времени релаксации пластических деформаций  $t_p^M$  от скорости резания (рисунок 3.14). При достижении скорости резания значения  $V_{кр}$  все рассматриваемые параметры изменяются несущественно.

В работе /39/ отмечается, что такое изменение параметров связано со сменой механизма разрушения: от вязкого к квазихрупкому и переходом сливной стружки к суставчатой (элементной).

Время образования элемента стружки  $t_c$  совпадает с запаздыванием пластических деформаций при резании  $t_p^M$ . Поскольку запаздывание пластической деформации совершается в зоне стружкообразования, то величину времени восстановления нарушенного внешним воздействием равновесия, т.е. время механической релаксации  $t_p^M$  можно определить по формуле /79/:  $t_c = t_p^M = \varepsilon / \varepsilon'$ ,

где  $\varepsilon$  - относительная деформация,  $\varepsilon'$  - скорость деформации.

Относительная деформация рассчитывается по формуле:

$$\varepsilon = \operatorname{ctg} \varphi + \operatorname{tg} (\varphi - \gamma). \text{ При } \varphi = 45^\circ, \gamma = 8^\circ, \varepsilon = 1,74.$$

Скорость деформации определяется следующей формулой:

$$\varepsilon' = \frac{V_C}{\Delta X}, \text{ где } V_C - \text{ скорость сдвига, м/с; } \Delta X - \text{ толщина слоя, претерпеваю-}$$

$$\text{щего этот сдвиг, м. } V_C = V_{\text{РЕЗ}} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos(\varphi - \gamma)}, \text{ м/с.}$$

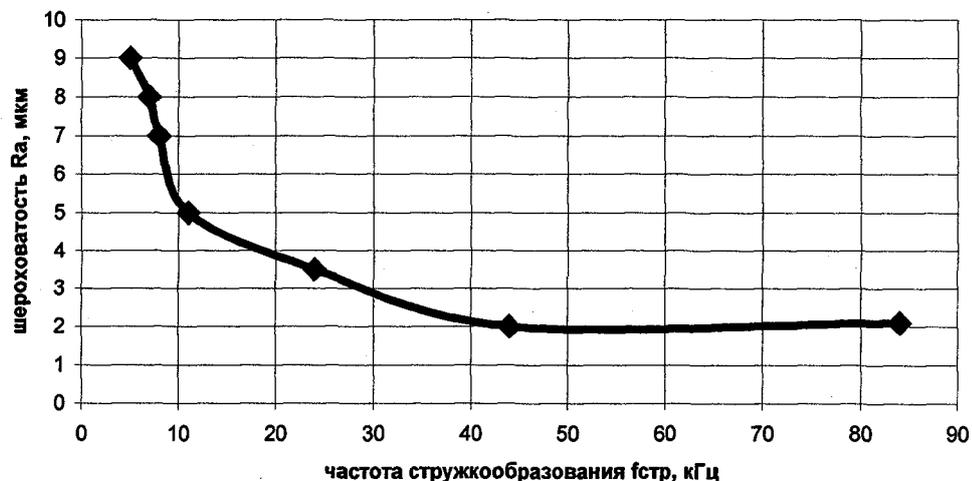
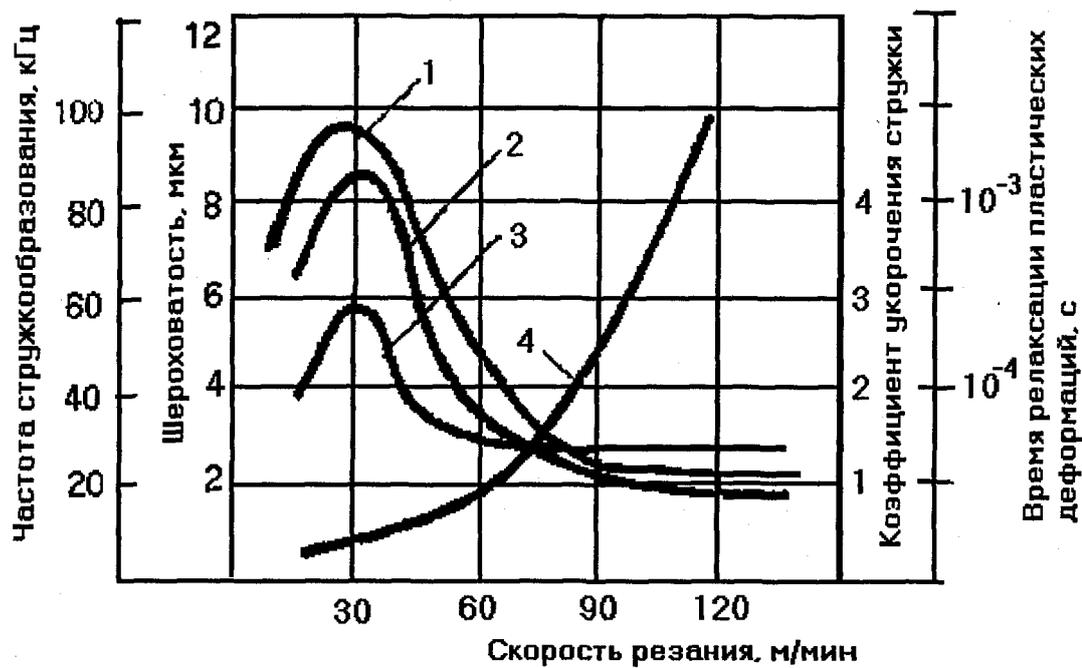


Рисунок 3.13. Зависимость шероховатости от частоты стружкообразования



1 -  $R_a$ ; 2 -  $t_c$ ; 3 -  $K_L$ ; 4 -  $f_{стр}$

Рисунок 3.14. Зависимость шероховатости  $R_a$ , коэффициента укорочения стружки  $K_L$ , частоты стружкообразования  $f_{стр}$  и времени релаксации пластических деформаций  $t_c$  от скорости резания

При скорости резания  $V_{\text{РЕЗ}} = 30 \text{ м/мин} = 0,5 \text{ м/с}$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\gamma = 8^\circ$ ;  
 $V_C = 0,62 \text{ м/с}$ ;  $\Delta X = 0,8 \text{ мм} = 0,0008 \text{ м}$ .

Тогда  $\varepsilon' = 775 \text{ с}^{-1}$  и  $t_p^M = 0,0023 \text{ с} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ .

Построение зависимости  $t_c$  от скорости резания (рисунок 3.14) указывает, что время релаксации пластических деформаций согласованно изменяется с параметром  $K_L$  и шероховатостью поверхности  $R_a$ .

Поэтому рост  $R_a$  с увеличением скорости резания связан как с наростом, так и с ростом времени релаксации пластических деформаций. В этой связи зависимости  $t_c = f(V)$  и  $f_{\text{стр}} = f(V)$  позволяют определить оптимальную скорость резания  $V_{\text{опт}}$ , где шероховатость является минимальной.

Таким образом, шероховатость поверхностного слоя может определяться значениями высоты нароста и времени релаксации пластических деформаций (времени сдвига элемента стружки).

При резании в зоне стружкообразования наблюдается непрерывное накопление плотности дислокации  $\rho$ , затем их перестройка во фрагментированные (ячеистые) структуры и при достижении критической плотности дислокаций  $\rho_{\text{кр}}$  на верхней границе зоны стружкообразования происходит разрушение этих структур по границам фрагментов с образованием вязких микротрещин и сдвиг элемента стружки [25].

Рост скорости резания обеспечивает более быстрое накопление плотности дислокаций  $\rho$  в зоне стружкообразования, их перестройку с образованием фрагментированных (ячеистых) структур, уменьшение зоны стружкообразования, а также более быстрое разрушение фрагментированных структур и сдвиг элемента стружки.

На рисунке 3.15 представлены зависимости  $R_z$  и  $f_{\text{стр}}$  от относительного сдвига  $\varepsilon$ . С ростом скорости резания уменьшаются  $\varepsilon$  и  $R_z$ , а также коэффициент утолщения стружки  $K_a$ .

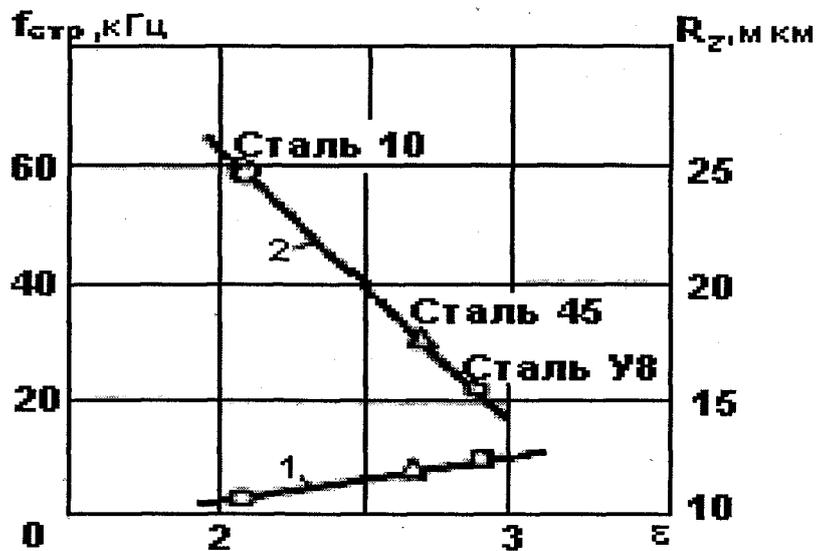


Рисунок 3.15. Зависимость частоты  $f_{стр}$  (1) и высоты неровностей  $R_z$  (2) от относительного сдвига  $\epsilon$  при  $V = 50$  м/мин

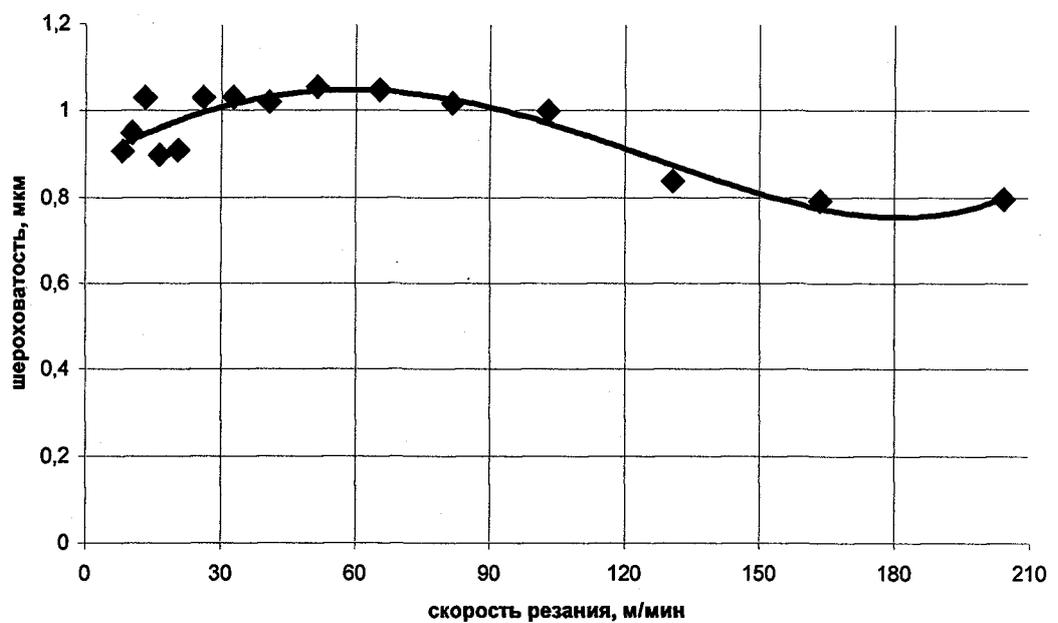


Рисунок 3.16. Зависимость шероховатости от скорости резания для титанового сплава 3М

Известно, что при обработке титановых сплавов параметр  $R_a$  с ростом скорости резания изменяется несущественно, что подтверждается результатами проведенных исследований (рисунок 3.16).

Согласно электронно-дислокационному механизму действия СОЖ, это следует связать с большим атомным радиусом титана /49/, что обуславливает высокую прочность связи кислорода с поверхностью и образование на прирезцовых слоях стружки окислов  $TiO_2$ , обладающих высокой смазочной способностью. Малая длина контакта, высокие температуры и смазочное действие окислов устраняют условия для развития нароста.

### 3.2.2. Зависимость шероховатости от подачи

Подача является важным элементом режима резания, влияющим на производительность процесса резания. При чистовой обработке увеличение подачи чаще ограничивается шероховатостью обработанной поверхности. При постоянной скорости резания повышение подачи приводит к росту степени деформации. При повышении подачи приходится снижать скорость резания, так как стойкость инструмента оказывается низкой.

Влияние подачи на высоту неровностей при точении детали из стали 45 представлено на рисунке 3.17. С ростом значений подачи параметр шероховатости  $R_a$  увеличивается. Оптимальная область значений подач, при которых можно получить поверхность с хорошим качеством находится в интервале значений 0,07 – 0,3 мм/об (рисунок 3.17).

### 3.2.3. Зависимость шероховатости от глубины резания

Характер изменения параметра  $R_a$  при изменении глубины резания носит немонотонный характер, с точкой перегиба приблизительно для значения  $t = 1,5$  мм (рисунок 3.18).

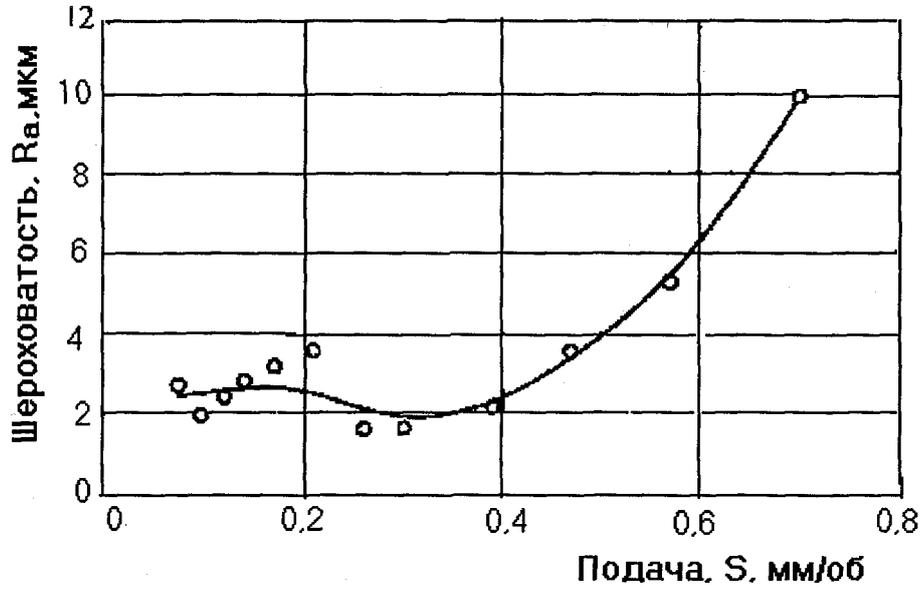


Рисунок 3.17. Зависимость шероховатости  $R_a$  от подачи  $S$ : сталь 45, резец Т15К6,  $V = 83$  м/мин,  $t = 1$  мм

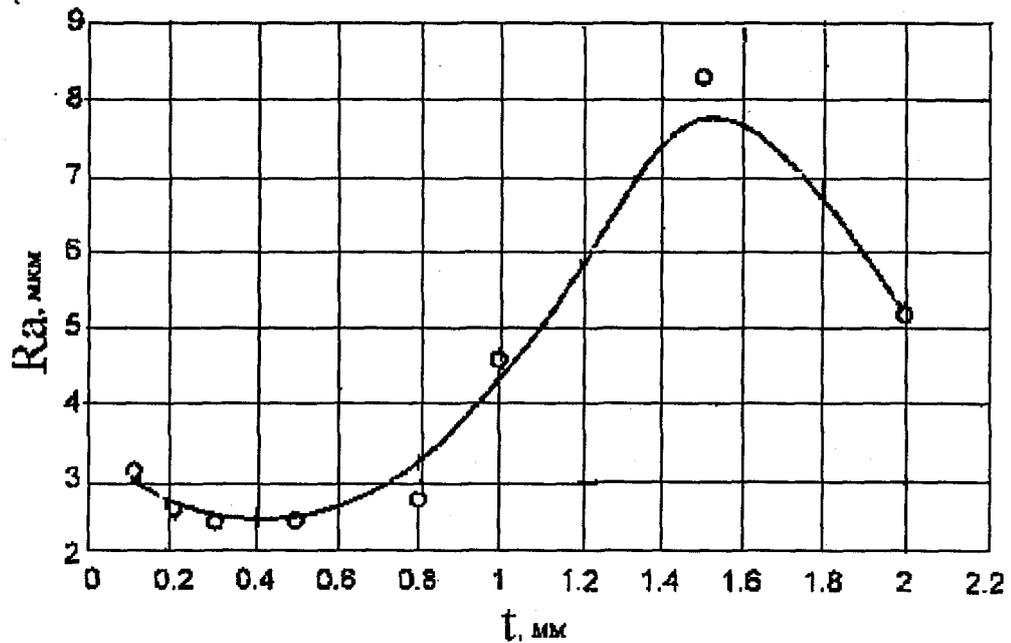


Рисунок 3.18. Зависимость шероховатости  $R_a$  от глубины резания  $t$ : сталь 45, резец Т15К6,  $V = 81$  м/мин,  $S = 0,21$  мм/об

В этой точке значение шероховатости начинает уменьшаться, что позволяет получить новую область оптимальных значений для обработки.

### 3.2.4. Влияние износа инструмента на шероховатость обработанной поверхности

В результате проведенных исследований установлены взаимные связи между высотой неровностей обработанной поверхности с одной стороны и высотой нароста и усадкой стружки с другой стороны. Большое значение для понимания и объяснения характера зависимостей  $R_a = f(V)$  имеет установление взаимосвязи между высотой неровности и интенсивностью износа инструмента.

Между трением и шероховатостью поверхности при резании металлов существует взаимная связь [29, 56, 57]. Повышение скорости резания, приводящее к уменьшению явлений адгезии, наростообразования и интенсивности износа инструмента, также снижает и высоту неровностей обработанной поверхности (рисунки 3.19, 3.20). Кроме того, эксперименты показали, что при точении с постоянной подачей с увеличением износа инструмента шероховатость поверхности уменьшается до некоторого значения износа, после чего начинает возрастать (рисунки 3.19, 3.20). Очевидно, существует какое-то критическое значение шероховатости, которое соответствует наиболее благоприятным условиям процесса резания, т.е. наименьшей интенсивности износа инструмента.

Таким образом, чтобы определить оптимальную скорость резания, т.е. скорость наименьшего износа, достаточно знать зависимость высоты неровностей (шероховатости) от скорости резания.

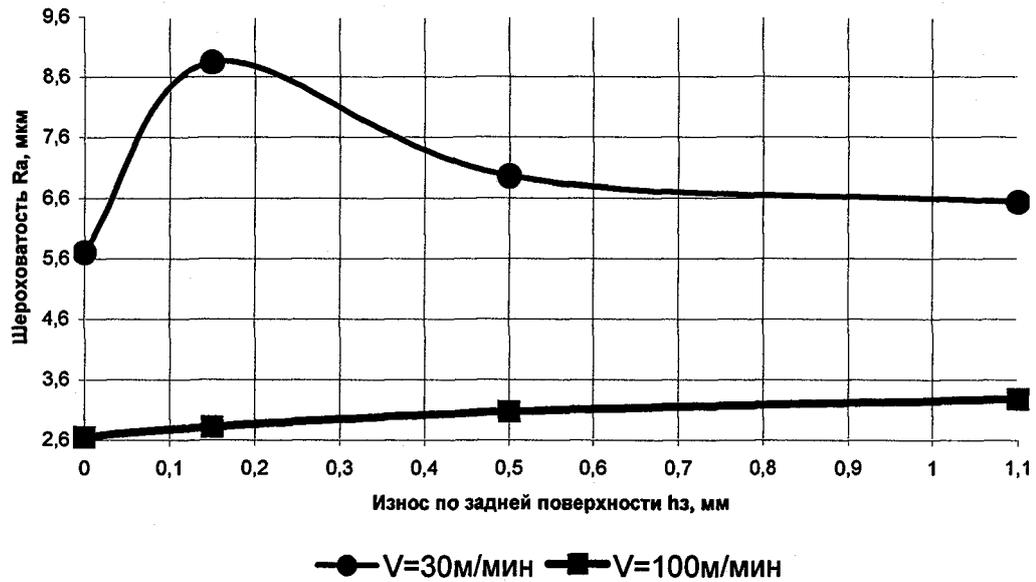


Рисунок 3.19. Зависимость шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности от износа инструмента (сталь 45, резец Т15К6,  $S = 0,11$  мм/об,  $t = 0,75$  мм)

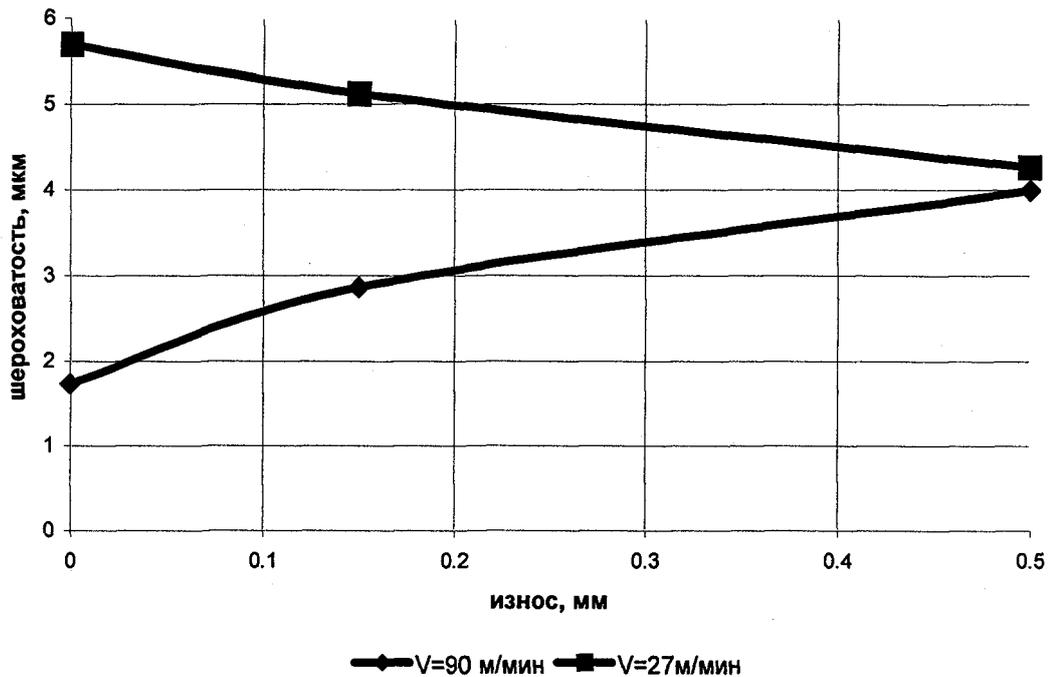


Рисунок 3.20. Зависимость шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности от износа резца (сталь У8, резец Т15К6,  $t=0,75$  мм,  $S = 0,11$  мм/об)

### 3.2.5. Зависимость шероховатости от упрочнения поверхностного слоя

Значительно большие возможности в технологическом управлении качеством поверхности имеются при внедрении таких методов обработки, как, например, разновидности отделочно-упрочняющей обработки (ОУО), в основе которой заложено поверхностно пластическое деформирование (ППД). Отделочно-упрочняющая обработка применяется для повышения усталостной прочности, износостойкости трущихся поверхностей, контактной прочности, жесткости и улучшения других эксплуатационных свойств деталей машин.

Исследовалось качество поверхностей образцов из стали 45 и У8 при выглаживании инструментом со сферической рабочей частью. Как известно, на высотные характеристики профиля микронеровностей при отделочно-упрочняющей обработке существенное влияние оказывает предшествующая обработка. Это относится и к физико-механическим свойствам поверхностного слоя. Исследование влияния отделочно-упрочняющей обработки на качество поверхности с учетом технологической наследственности является актуальным вопросом. Эта задача может решаться в двух вариантах.

В одном случае исследуют зависимость качества поверхности после ППД от условий (т.е. режимов резания, геометрии инструмента и т.д.) предварительной и окончательной обработки, минуя исследования качества поверхности до ОУО. Такие зависимости могут быть использованы при назначении режимов механической обработки и ППД для получения поверхностей заданного качества. Однако при этом должны быть известны зависимости для определенного вида механической обработки, применяемого в каждом конкретном случае.

В другом случае рассматривают связь качества поверхности после ППД с предшествующим качеством поверхности и условиями отделочно-упрочняющей обработки.

Следует, однако, отметить, что исследование технологической наследственности при ОУО является весьма сложной задачей, так как на любую характеристику качества окончательно обработанной поверхности могут оказать влияние несколько характеристик, полученных на предшествующих операциях.

Упрочнение поверхности проводилось алмазным выглаживателем с диаметром шарика 4 мм;  $n = 100 \text{ мин}^{-1}$ ;  $S = 0,07 \text{ мм/об}$ ; нагрузка 80 кг.

В качестве предварительной обработки рассматривалось точение твердосплавными резцами. Схема сглаживания исходных микронеровностей представлена на рисунке 3.21.

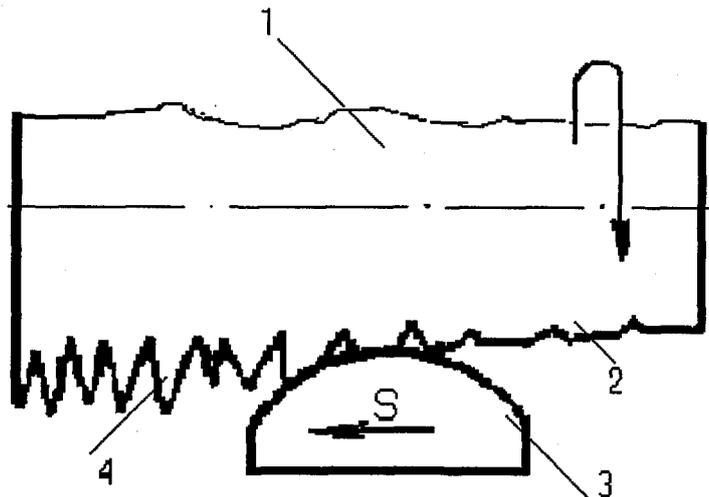


Рисунок 3.21. Схема сглаживания исходных неровностей

Деталь 1 вращается, инструмент 3 осуществляет движение подачи; при этом после рабочего хода сглаживающего инструмента исходная шероховатость 4 получает профиль 2.

Значения шероховатости после выглаживания уменьшились примерно в четыре раза (рисунки 3.22 и 3.23).

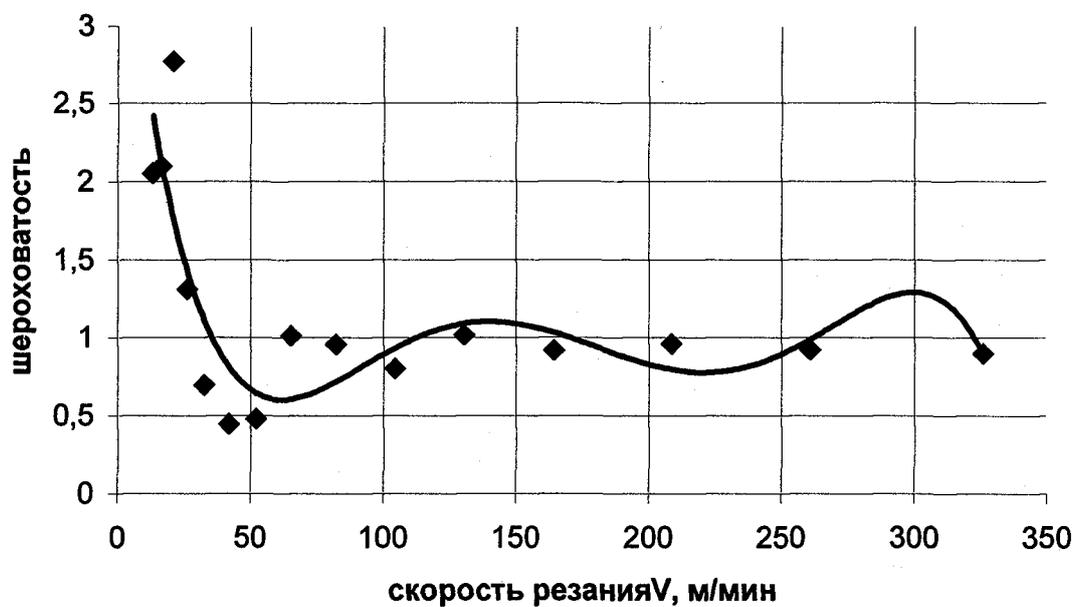


Рисунок 3.22. Зависимость шероховатости от скорости резания после упрочнения для стали 45

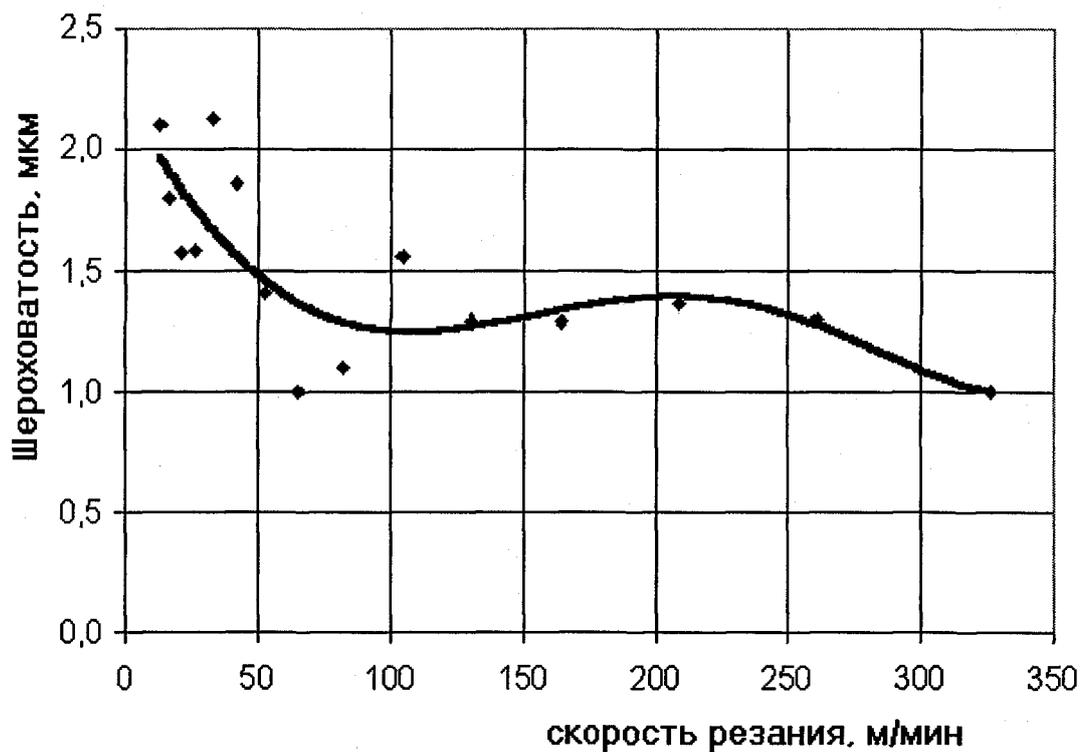


Рисунок 3.23. Зависимость шероховатости от скорости резания после упрочнения для стали У8

Однако характер зависимости шероховатости от скорости резания до и после упрочнения сохранился (см. рисунки 3.9 и 3.10).

Результаты проведенных исследований согласуются с известными работами других исследователей /11, 13, 17, 22, 33, 36, 50, 58, 64, 93, 95/.

### **3.3. Механизм формообразования при резании**

Проблема управления процессами механообработки в автоматизированном производстве обуславливает необходимость углубления представлений о механизмах формообразования при резании и факторах, влияющих на качество обработанной поверхности.

Механизмы формообразования исследовали при резании углеродистых сталей 10, 40, 45, У8, 40Х и титанового сплава 3М. Режим резания: скорость  $V = 5 \div 300$  м/мин, подача  $s = 0,07 \div 0,21$  мм/об, глубина резания  $t = 1$  мм.

В результате электронно-микроскопического исследования характера деформирования обработанной поверхности установлено, что при резании с низкими скоростями на ней выявляются микротрещины, углубления (рисунок 3.24) с волнообразной структурой. При металлографическом исследовании подошвы нароста здесь также наблюдается завихренная структура (рисунок 3.4). Наличие вихревых структур на обработанной поверхности и подошве наростов (рисунки 3.4, 3.24), а также уширение поверхности позволяют полагать, что процессы, происходящие в зоне стружкообразования  $\alpha ABb$  (рисунок 3.25), оказывают большое влияние на параметры обработанной поверхности. Эти исследования позволяют также указать механизмы формообразования при резании.

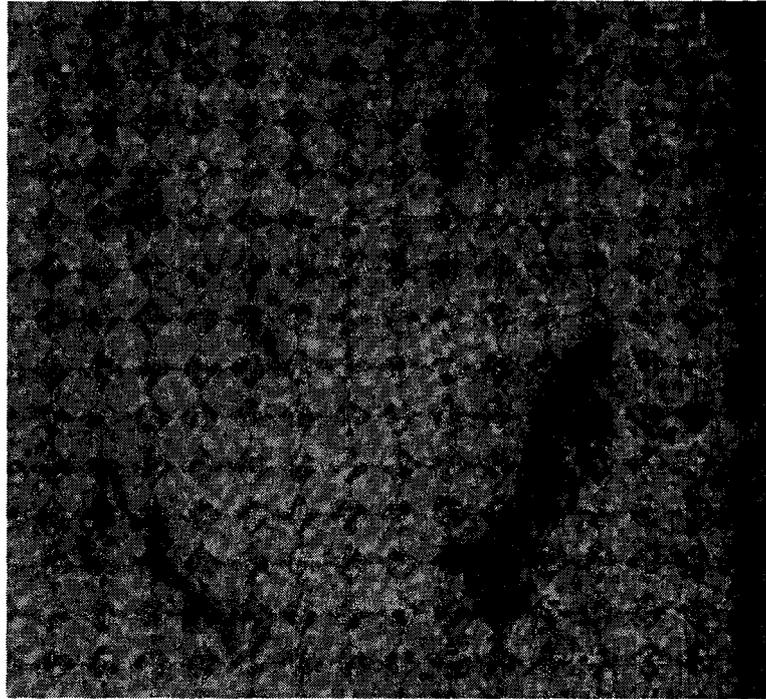


Рисунок 3.24. Волновое строение поверхностного слоя ( $\times 350$ ) при резании стали 10 ( $V = 30$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм). Завихренная структура с дефектами в виде микротрещин и пор

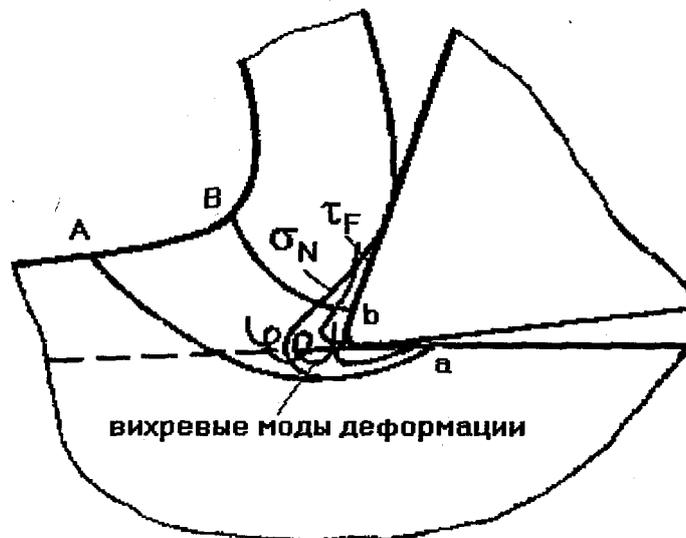


Рисунок 3.25. Модель образования стружки и формирование поверхностного слоя детали при резании ( $\sigma_N, \tau_F$  – нормальные и касательные напряжения)

Механизм формообразования при низких скоростях резания с образованием стружки скалывания тесно связан с возникновением трещин скола или опережающих трещин (рисунок 3.26) /25/, образующихся под воздействием локализации деформации на стыках зерен и их поворота в окрестности режущего лезвия.

С ростом скорости резания, как показывают исследования, механизм деформирования срезаемого слоя изменяется. Наряду с трансляционной (дислокационной) модой деформации реализуется ротационная мода деформации, которая связана с коллективным движением дислокаций значительной плотности ( $\rho \approx 10^{12} \div 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), что вызывает неоднородную пластическую деформацию сжатия в зоне стружкообразования. Вихревые (ротационные) моды деформации обеспечивают также высокую степень деформации, упрочнение металла в окрестностях режущего лезвия и образование нароста. Образование нароста тесно связано с затормаживанием объемов обрабатываемого металла под действием сил трения, что обеспечивает им дальнейший рост. Наряду с этим, вихревой механизм движения структурных элементов (дислокаций, границ фрагментов, зерен и т.д.) вызывает в окрестностях режущего лезвия высокие внутренние напряжения  $\sigma_i$ . Внутренние напряжения в материале при повышении плотности дислокаций в первом приближении оцениваются формулой /76/:

$$\sigma_i = \alpha G b_1 \rho^{1/2},$$

где  $\alpha$  – коэффициент;  $G$  – модуль сдвига;  $b_1$  – вектор Бюргерса;  $\rho$  – плотность дислокаций.

В субграницах плотность  $\rho = 5 \cdot 10^{12} - 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Следовательно, внутренние напряжения  $\sigma_i$  при указанной плотности дислокаций (для стали  $10 G = 6,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}$ ,  $b_1 = 2,48 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ) могут составлять 530 МПа, что выше предела прочности на разрыв стали 10.

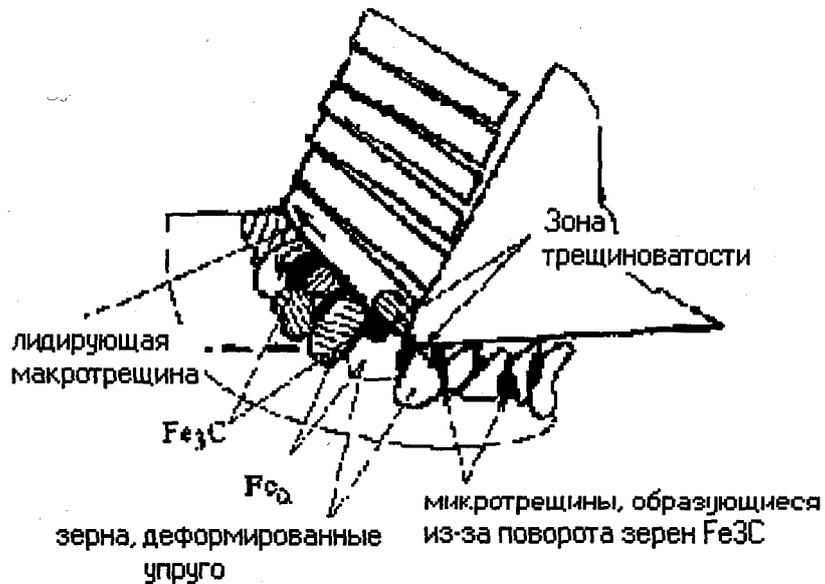
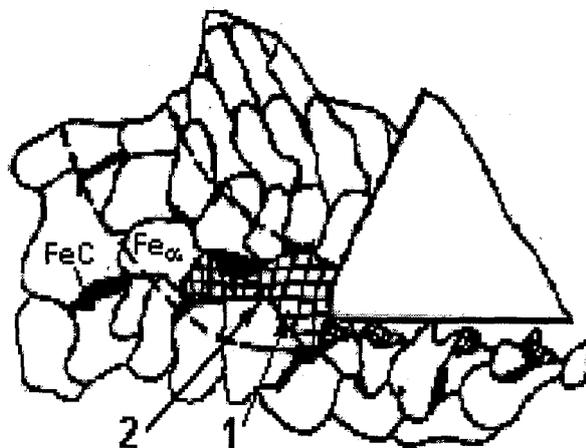


Рисунок 3.26. Схема, иллюстрирующая механизм деформации структурных элементов стали в зоне стружкообразования и образования поверхностного слоя детали при низких скоростях резания  $V < V_H$



1 – фрагментация зерен; 2 – микротрещины, формирующие неровности поверхности

Рисунок 3.27. Схема механизма образования неровностей на обработанной поверхности детали при  $V > V_H$

В этой связи, зависимость  $R_z$  от  $V$  (рисунки 3.9, 3.10) также следует рассматривать с позиций изменения механизмов деформирования срезаемого слоя и образования стружки с ростом скорости резания. Высокие значения параметров шероховатости и наличие микротрещин на обработанной поверхности при малых скоростях резания обусловлены различной ориентировкой зерен (заштриховано) в материале (рисунок 3.26), вследствие этого концентрацией напряжений на границах зерен и колебанием их размеров. В процессе резания деформация локализуется в благоприятно ориентированных зернах, мелкие зерна деформируются упруго, а зерна цементита  $Fe_3C$  совершают ротации.

Высокая сдвиговая устойчивость цементита и отдельных зерен феррита, а также меньшая степень деформации  $\epsilon$  вблизи линии среза обуславливает также меньшую степень упрочнения обработанной поверхности и запасенную в ней энергию деформирования  $\Delta U_d^3$ . Развитие трещины скола осуществляется по межзеренным границам.

В результате  $R_z$  и  $R_a$  при  $V < V_H$  ( $V_H$  – скорость интенсивного наростообразования) имеют высокие значения.

При  $V > V_H$  однородное деформирование зерен из-за роста температуры, фрагментация дислокационной структуры, релаксация напряжений на границах зерен и развитие трещин по границам фрагментов (рисунок 3.27) обеспечивают уменьшение параметра шероховатости  $R_a$  и его стабилизацию. Поэтому высотные параметры шероховатости находятся в диапазоне от нескольких долей до нескольких микрометров (рисунки 3.9, 3.10).

На рисунке 3.28 приведена /39/ схема формирования поверхностного слоя при резании с опережающей зоной деформации в условиях моделирования.

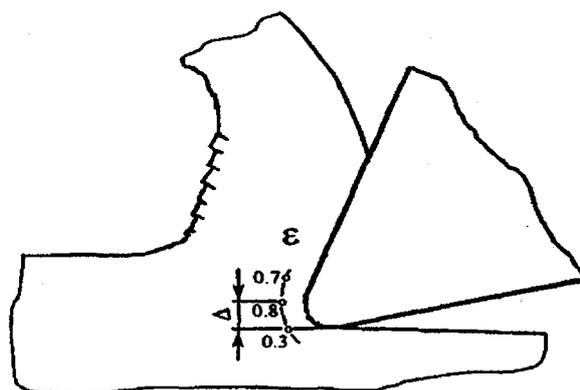


Рисунок 3.28. Механизм формообразования поверхностного слоя

Анализ рисунка показывает, что образование зоны трещиноватости будет происходить выше линии среза на величину  $\Delta$ , так как деформация здесь меньше  $\varepsilon_{\max} \approx 0,3$ . Поэтому часть несрезанного металла будет упрочняться режущим лезвием из-за его подминания. Оценим возможность нарушения сплошности в окрестности режущего лезвия, где формируются напряжения сжатия, а локальные деформации  $\varepsilon_{\text{л}}$  достигают значений 0,76 – 0,8 [39]. Для этой цели используем деформационный критерий [10]:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} = 2 \cdot \frac{\ln d_3}{\ln d_{\text{я}}},$$

где  $d_3$  – средний размер зерна ( $\approx 30$  мкм для стали 45);

$d_{\text{я}}$  – размер фрагмента (ячейки) ( $\approx 0,1$  мкм для стали 45).

Для стали 45  $\varepsilon_{\text{л}} = 0,761$ , что соответствует локальному значению  $\varepsilon_{\text{л}}$  при резании (рисунок 3.28). Следовательно, локальные значения  $\varepsilon_{\text{л}} = 0,76 - 0,8$  в окрестности режущего лезвия являются предельными.

В результате, как показывают расчеты по деформационному критерию, впереди режущего лезвия возможно образование каскада пор и микротрещин (рисунок 3.26), которые в процессе дальнейшего упрочнения материала и роста напряжений образуют вязкую микротрещину. Сдвиговая деформация на верхней границе стружкообразования заканчивается хрупким сколом.

Расчеты показывают, что образование микротрещин в окрестности режущего лезвия начинается до завершения сдвиговой деформации. Причем, в окрестности режущего лезвия создается каскад микротрещин (зона трещиноватости), так как  $\epsilon$  в пределах 0,76 – 0,8 охватывает целую область и располагается выше теоретической линии среза на величину  $\Delta$  (рисунок 3.28). Зону трещиноватости с позиций теории синергетики следует рассматривать как пространственно-временную структуру.

Следовательно, на величину шероховатости ( $R_a$ ) будет влиять размер зерен обрабатываемого материала, которые в зоне стружкообразования деформировались упруго ниже линии среза, особенно при низких скоростях.

Известно, что при обработке сталей с малым средним размером зерна наблюдаются более низкие значения  $R_a$  и более высокие значения микротвердости поверхностного слоя  $\Delta H_u$ . В мелких зернах резко увеличивается плотность дислокаций. Напротив, в крупнозернистой структуре на границах зерен возрастает локализация деформаций и концентрация напряжений, что снижает пластичность металла и способствует образованию трещин. Поэтому производство стали с однородной мелкозернистой структурой будет способствовать повышению качества обработки.

Связь шероховатости ( $R_z$ ) с частотой стружкообразования ( $f_{стр}$ ) и степенью деформации ( $\epsilon$ ) указывает на то, что шероховатость обработанной поверхности определяется размером фрагментов и механизмом разрушения дислокационных структур, образующихся в зоне стружкообразования (рисунок 3.25). Анализ [20] показывает, что высота неровностей  $R_z$  соизмерима с размером фрагмента дислокационной структуры (10...100мкм).

При обработке стали У8 высокие значения  $\sigma_N$  и  $\sigma_{гид}$  способствуют формированию дислокационных структур с меньшим размером фрагментов (ячеек), чем при резании стали 45. Разрушение фрагментированных

структур происходит путем вязкого механизма образования микротрещин по границам фрагментов с последующим дискретным скачкообразным их объединением (рисунок 3.27), что с возрастанием энергии  $\Delta U_{д}^3$  в процессе деформирования элемента стружки [25] обеспечивает его сдвиг. Волновое строение поверхностного слоя (рисунок 3.24) свидетельствует о большой роли вихревого движения структурных элементов в окрестностях режущего лезвия в механизме формирования поверхностного слоя.

С ростом скорости резания увеличение нормальных напряжений ( $\sigma_N$ ) на передней поверхности инструмента способствует более быстрому образованию фрагментированных структур в зоне стружкообразования, их разрушению и уменьшению размера фрагмента, вследствие чего шероховатость поверхности снижается.

Уменьшение степени деформации  $\varepsilon$  с ростом скорости резания  $V$  и адиабатические условия в зоне стружкообразования уменьшают возможность реализации вихревого механизма деформации и образования нароста. Это обуславливает снижение высоты нароста  $H$ , параметра шероховатости  $R_z$  на поверхностном слое, степени и глубины его наклепа.

Таким образом, шероховатость поверхностного слоя существенно определяется деформационными характеристиками срезаемого слоя (степенью деформации  $\varepsilon$ , коэффициентом укорочения стружки  $K_a$ , частотой стружкообразования  $f_{стр}$ ).

Запаздывание и рост степени пластических деформаций при образовании элемента стружки вызывает относительные колебания инструмента и заготовки [19], что повышает параметр  $R_z$ . Необходимо отметить, что диапазон скоростей резания с максимальной амплитудой относительных колебаний инструмента и заготовки практически совпадает со скоростью резания, где высота нароста  $H$  и параметр  $R_z$  максимальные (рисунки 3.1, 3.2). Таким образом, повышение значения  $R_z$  при низких скоростях резания

связано как с процессом наростообразования, так и высоким уровнем амплитуды вибраций при резании.

Согласно работе /77/ минимальное значение  $\epsilon$  наблюдается (рисунок 3.11) при  $K_L = 1$  и определяется передним углом  $\gamma$  инструмента и свойствами обрабатываемого материала. Следовательно, по изменению деформационных характеристик срезаемого слоя ( $\epsilon$  и  $K_L$ ) с ростом скорости резания также можно прогнозировать влияние относительных колебаний инструмента и заготовки на параметр  $R_z$ .

При обработке сталей условие  $R_z \rightarrow \min$  соблюдается при скорости резания, обеспечивающей  $\epsilon \rightarrow \min$  и  $K_L \rightarrow 1$ .

### 3.4. Выводы

1. Металлографическими исследованиями установлено, что на подошве наростов фиксируются вихревые (поворотные) моды деформации. На этой основе предложена модель образования нароста и разработан механизм формообразования при резании.

2. Установлена корреляционная связь частоты образования элементов стружки с шероховатостью обработанной поверхности. В этой связи частоту стружкообразования  $f_{стр}$  можно рассматривать диагностирующим признаком, позволяющим прогнозировать шероховатость поверхностного слоя при резании.

3. В целом, выявленные зависимости шероховатости  $R_a$  от условий резания согласуются с литературными данными. Однако вследствие невозможности измерения шероховатости непосредственно в процессе резания остро стоит задача установления новых критериев оценки шероховатости коррелирующих с параметрами  $R_a$ ,  $R_z$  и четко поддающихся автоматизации измерения в процессе обработки.

## **ГЛАВА 4. ОЦЕНКА ШЕРОХОВАТОСТИ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОДХОДОВ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ И ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ**

Процесс резания обычно сопровождается формированием шероховатых поверхностей у деталей машин. В ряде работ [6, 52] показано, что шероховатость обработанной поверхности при резании является фрактальной. Существуют также модели трения для фрактальных поверхностей. Для обеспечения качества обработки детали исследования динамики процесса резания должны быть направлены на установление взаимосвязи динамических явлений и качества поверхностного слоя. Характер поведения динамической системы можно описать при помощи следующих характеристик: фрактальной размерности –  $D_0$ , информационной энтропии –  $H_1$ , погрешности самоподобия –  $\Delta$ .

### **4.1. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхностного слоя от условий обработки**

#### **4.1.1. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от скорости резания**

Алгоритмы обработки результатов измерений позволили рассчитать фрактальную размерность  $D$  той или иной профилограммы, рассматриваемой как временной ряд. Временной ряд – есть «случайное» хаотическое множество. Анализ поведения данного хаотического множества на заданном временном интервале позволяет проводить оценку его фрактальной размерности  $D$ . По результатам проведенных исследований, в соответствии с алгоритмами оценки фрактальности (глава 2) были получены следующие зависимости (рисунки 4.1, 4.2, 4.3).

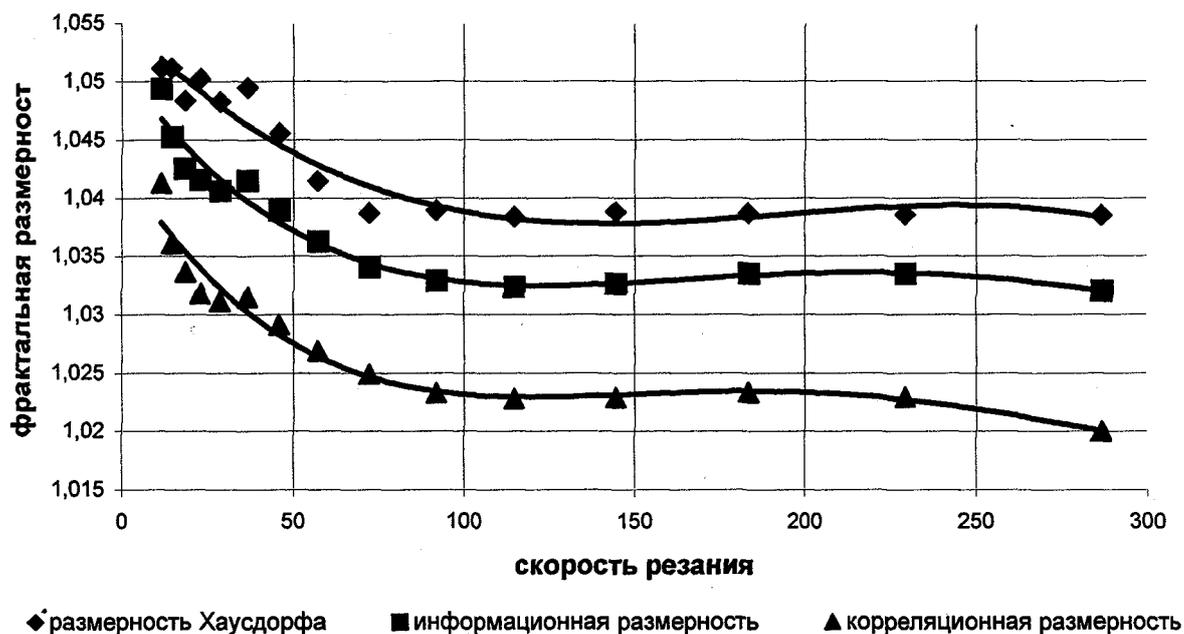


Рисунок 4.1. Зависимость обобщенных фрактальных размерностей от скорости резания для стали 45

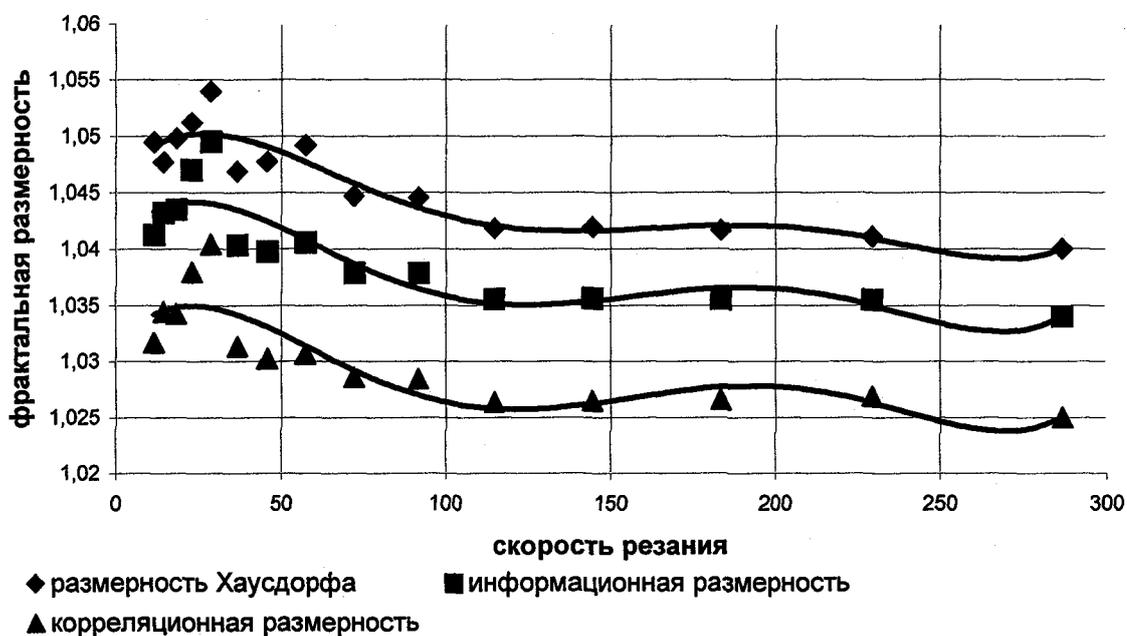
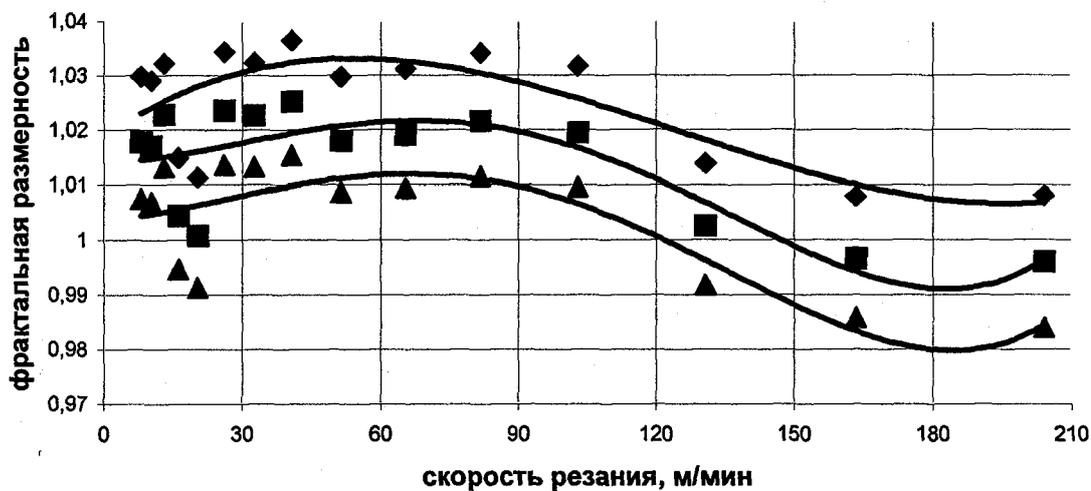


Рисунок 4.2. Зависимость обобщенных фрактальных размерностей от скорости резания для стали У8



◆ размерность Хаусдорфа ■ информационная размерность ▲ корреляционная размерность

Рисунок 4.3 Зависимость обобщенных фрактальных размерностей от скорости резания для титанового сплава 3М

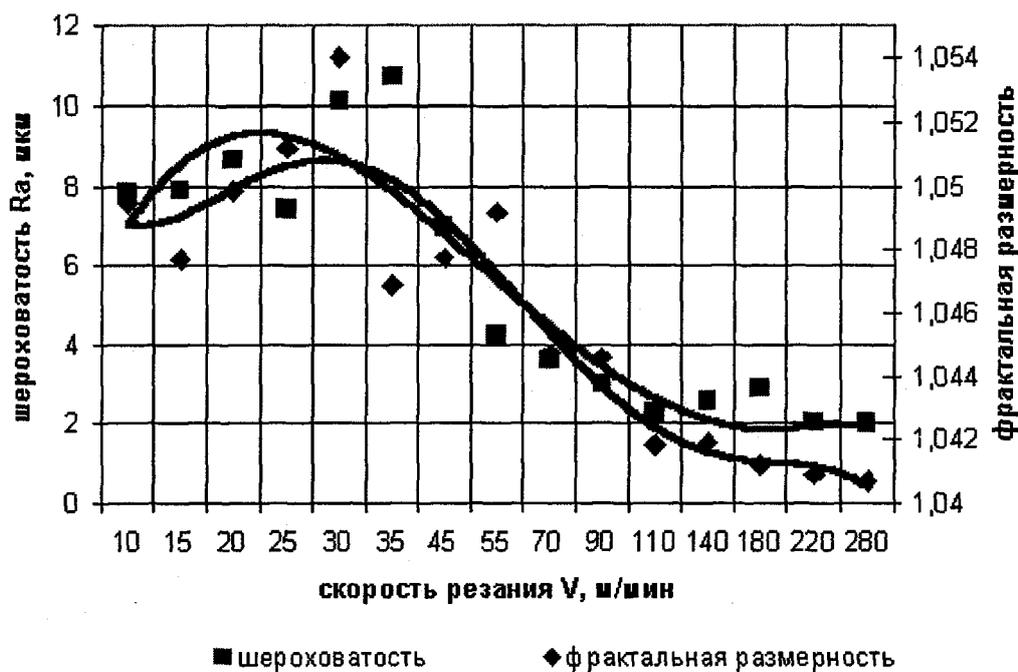


Рисунок 4.4. Зависимость фрактальной размерности и шероховатости поверхности от скорости резания для стали У8, резец Т15К6,  $S = 0,11$  мм/об

Анализ экспериментальных данных показывает, что, во-первых, корреляционная размерность  $D_2$  меньше информационной размерности  $D_1$  и меньше хаусдорфовой размерности  $D_0$ , что подтверждает равенство (2.20).

Во-вторых, установлено, что фрактальная размерность  $D_0$  шероховатости поверхности от скорости резания изменяется немонотонно. Однако для скоростей резания  $V > 80$  м/мин фрактальная размерность шероховатости поверхности примерно одинакова.

В-третьих, анализ зависимостей показывает, что увеличение фрактальной размерности шероховатости поверхности, как и самой шероховатости (рисунок 4.4), происходит в области скоростей меньших 30 м/мин, т.е. в области формирования нароста, а точнее образования системы налипов /40/, динамической диссипативной структуры, образующейся из области высоких и низких давлений. Это приводит к резкому изменению  $q_N$  удельных нормальных давлений и  $\mu$  среднего коэффициента трения, вызывающих изменение фрактальной размерности  $D_0$ .

Незначительное увеличение обобщенных фрактальных размерностей для скоростей резания больших 240 м/мин можно объяснить возросшими силами резания.

#### 4.1.2. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от обрабатываемого материала

Из графиков, представленных на рисунках 4.1 – 4.2, видно, что фрактальная размерность шероховатости поверхности стали У8 меньше, чем стали 45. Еще меньшая фрактальная размерность шероховатости поверхности наблюдается при обработке титанового сплава 3М (рисунок 4.3). В этой связи, процесс формообразования при обработке титанового сплава можно считать самоподобным и наиболее устойчивым.

Зависимость фрактальной размерности от обрабатываемого материала представлена на рисунке 4.5. Следует отметить (рисунок 4.5), что процесс формообразования при обработке стали У8 является более устойчивым, чем при обработке стали 45, что согласуется с результатами работы /40/.

#### **4.2. Информационная энтропия шероховатости обработанной поверхности**

Числовое значение энтропии является количественной характеристикой степени хаотичности образования неровностей на поверхностном слое. По разработанному алгоритму (см. главу 2) рассчитывались значения информационной энтропии  $H_1$  шероховатости обработанной поверхности.

Графики зависимостей информационной энтропии шероховатости поверхности  $H_1$  от скорости резания  $V$  представлены на рисунках 4.6, 4.7. Если энтропия стремится к нулю, то система является полностью детерминированной. Так будет в случае регулярных, устойчивых процессов.

Энтропия  $H_1$  шероховатости с хаотической динамикой положительна, но имеет конечное значение. Для истинно случайных процессов энтропия неограниченно велика. Как было установлено ранее (см. глава 3), в процессе течения с наростом устойчивое формообразование нарушается хаотическими возмущениями, вызванными вихревым характером движения обрабатываемого материала в зоне резания.

Из графиков (рисунок 4.8) видно, что хаотическое образование неровностей поверхности наблюдается лишь в определенном интервале скоростей резания и времени работы, в частности, при скоростях резания, соответствующих процессу интенсивного наростообразования ( $V \approx 30$  м/мин).

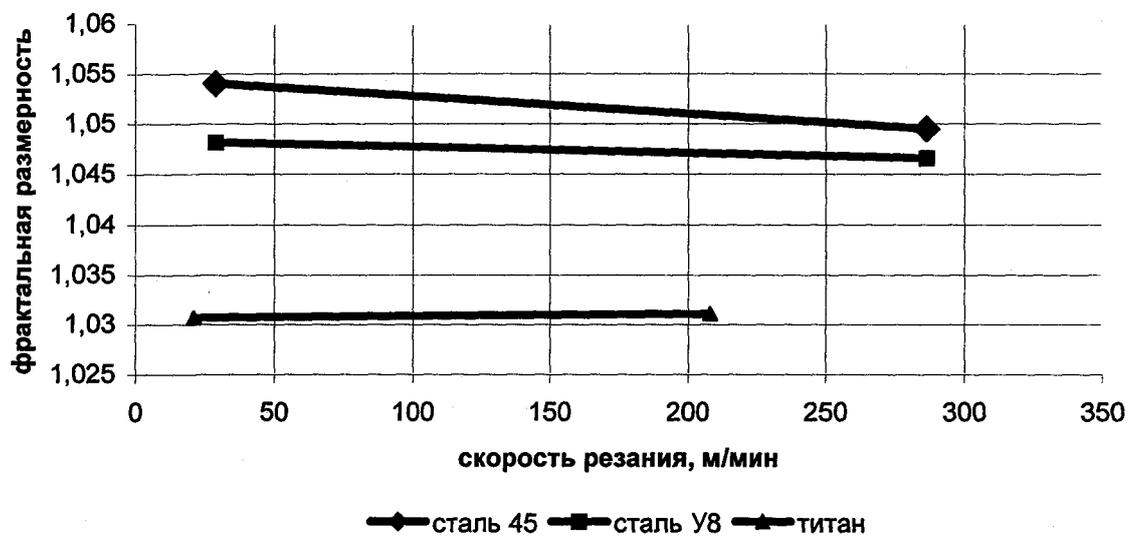


Рисунок 4.5. Зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности от обрабатываемого материала

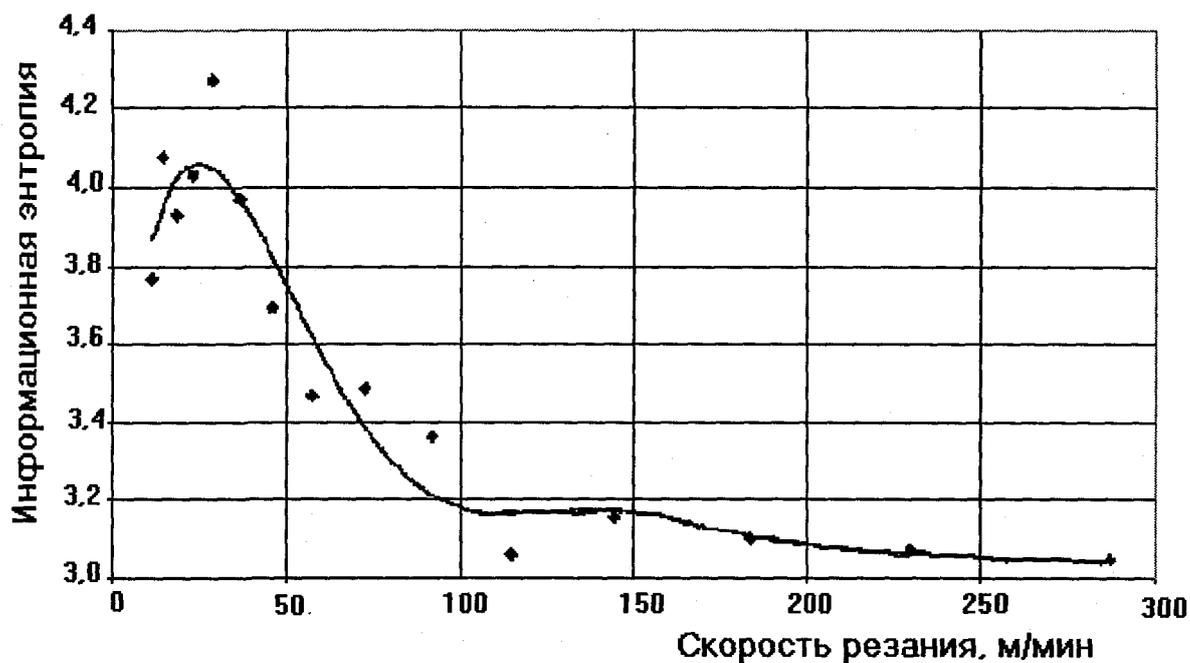


Рисунок 4.6. Зависимость информационной энтропии от скорости резания для стали У8

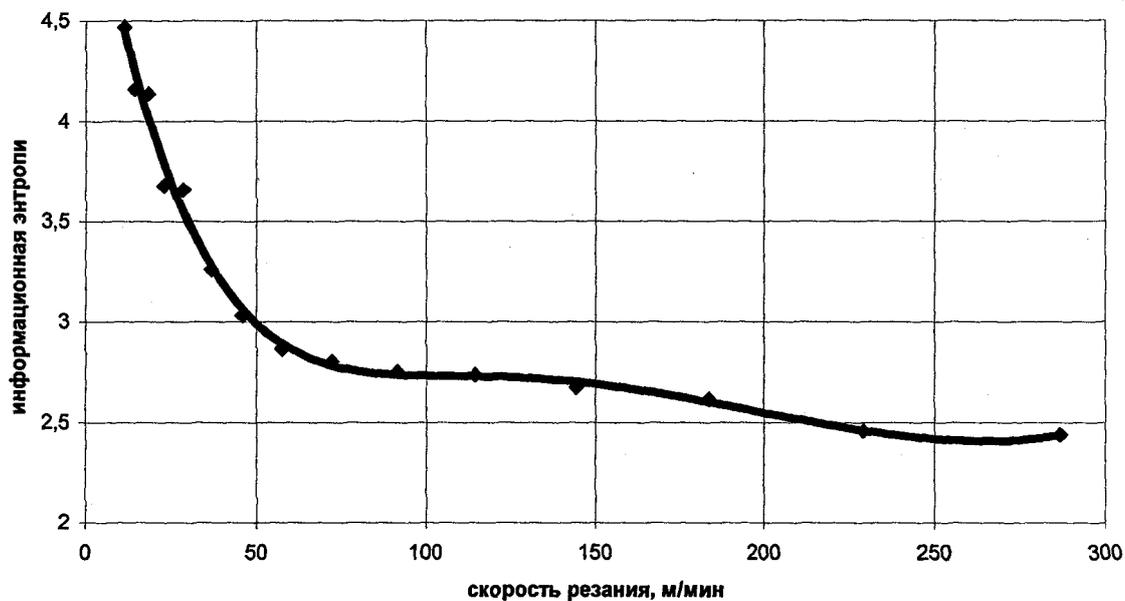


Рисунок 4.7 Зависимость информационной энтропии от скорости резания для стали 45

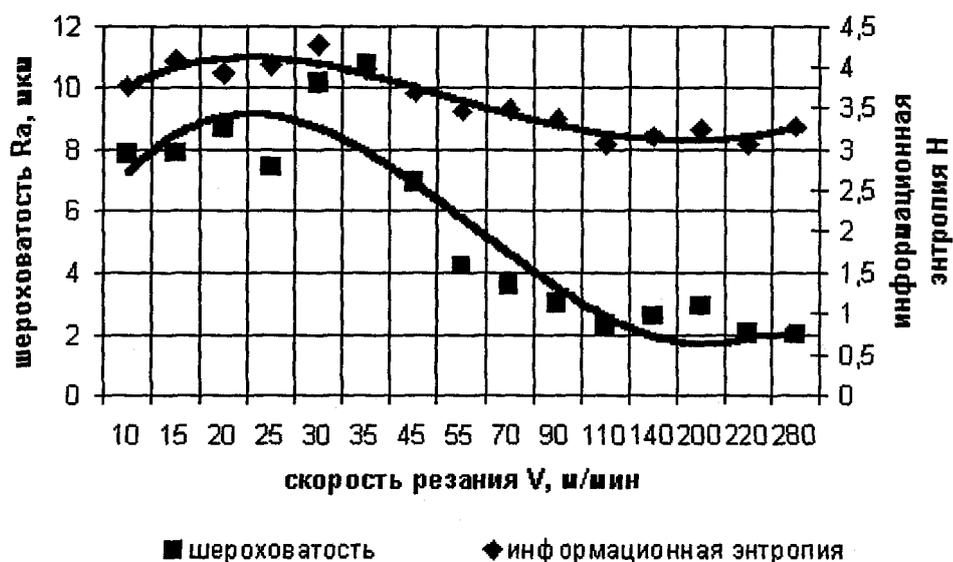


Рисунок 4.8. Зависимость информационной энтропии и шероховатости поверхности от скорости резания для стали У8, резец Т15К6, S = 0,11 мм/об

### **4.3. Зависимость фрактальной размерности и информационной энтропии шероховатости поверхности от износа инструмента**

В начальный момент резания (износ инструмента равен нулю) параметры системы резания не являются оптимальными, поэтому на этапе приработки система резания находится в неустойчивом состоянии (первые точки на рисунках 4.9 и 4.10).

Процессы самоорганизации приводят систему резания в новое устойчивое состояние с минимальным уровнем запасенной энергии и производством энтропии для текущих условий резания – начинается этап «нормального» изнашивания, интенсивность изнашивания снижается, фрактальная размерность и информационная энтропия изменяются незначительно (рисунки 4.9, 4.10).

При достижении инструментом предельной величины износа ( $h_3 \approx 0,5\text{мм}$ ) устойчивость системы резания нарушается, что приводит к увеличению интенсивности изнашивания инструмента и резкому изменению фрактальной размерности и информационной энтропии. Это, в свою очередь, может служить диагностическим признаком потери режущей способности инструмента.

### **4.4. Оценка погрешности самоподобия шероховатости поверхностного слоя**

Исследуемый временной ряд представлен как самоподобное (фрактальное) множество, но с некоторой погрешностью. На основе анализа этой погрешности можно судить насколько самоподобен ряд в разных своих частях.

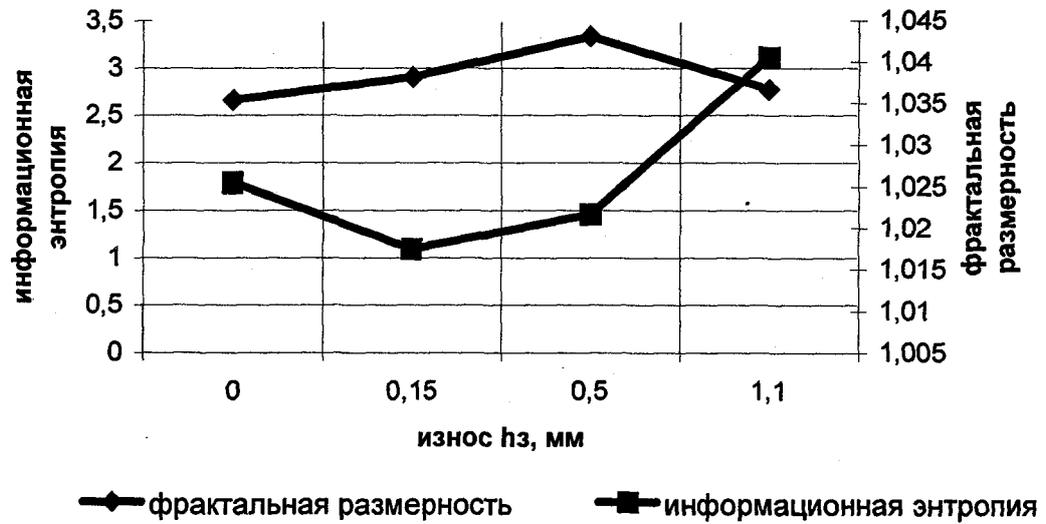


Рисунок 4.9. Зависимость фрактальной размерности и информационной энтропии шероховатости поверхности от износа инструмента для стали У8, резец Т15К6,  $V = 90$  м/мин,  $S = 0,11$  мм/об

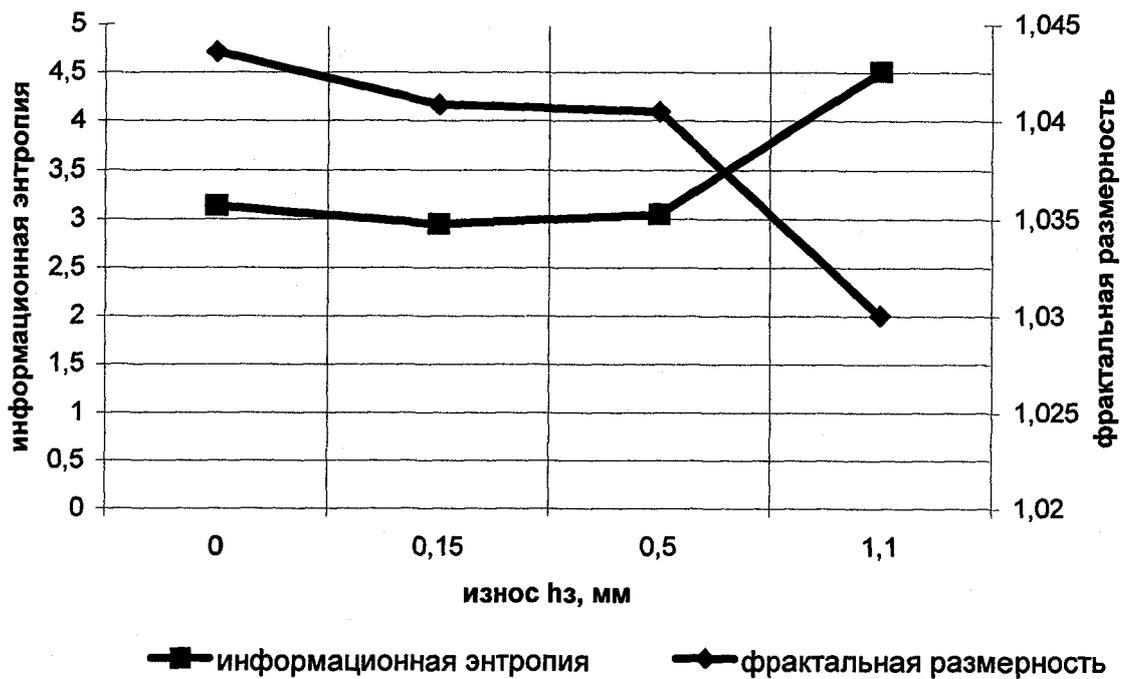


Рисунок 4.10. Зависимость фрактальной размерности и информационной энтропии шероховатости поверхности от износа инструмента для стали 45

Если погрешность исследуемого участка ряда мала и, соответственно, он в большей степени самоподобен, то на этом интервале временной ряд менее хаотичен. Если же погрешность самоподобия оказалась достаточно большой, то делается вывод, что ряд на этом участке более хаотичен.

На рисунках 4.11 – 4.13 показано изменение погрешности самоподобия шероховатости поверхности от скорости резания для различных материалов.

Анализ приведенных зависимостей для стальных заготовок показывает, что хаотическое образование неровностей наблюдается лишь в области низких и средних скоростей. Это обусловлено контактными процессами, вызывающими изменение рельефа поверхности трения из-за ее износа и образование областей высокого давления в поверхностных слоях инструмента, скачкообразно изменяющих здесь значения удельных давлений  $q_N$  и коэффициента трения  $\mu$ .

Для титанового сплава погрешность самоподобия шероховатости поверхности изменяется незначительно (рисунок 4.13), поэтому процесс формообразования при обработке титанового сплава можно считать самоподобным.

Чтобы выяснить, насколько хаотичность динамики процесса резания (параметры  $D_0$ ,  $H_1$  и  $\Delta$ ) влияют на шероховатость получаемой поверхности проведем корреляционный анализ зависимостей  $R_a$ ,  $D_0$ ,  $H_1$ ,  $\Delta = f(V)$ .

Коэффициент корреляции функций  $R_a = f(V)$  и  $D_0 = f(V)$  для стали У8 получился равным 0,746, а для стали 45 – 0,782.

Коэффициент корреляции функций  $R_a = f(V)$  и  $H_1 = f(V)$  для стали У8 – 0,952, а для стали 45 – 0,923.

Коэффициент корреляции функций  $R_a = f(V)$  и  $\Delta = f(V)$  для стали У8 – 0,853, а для стали 45 – 0,822.

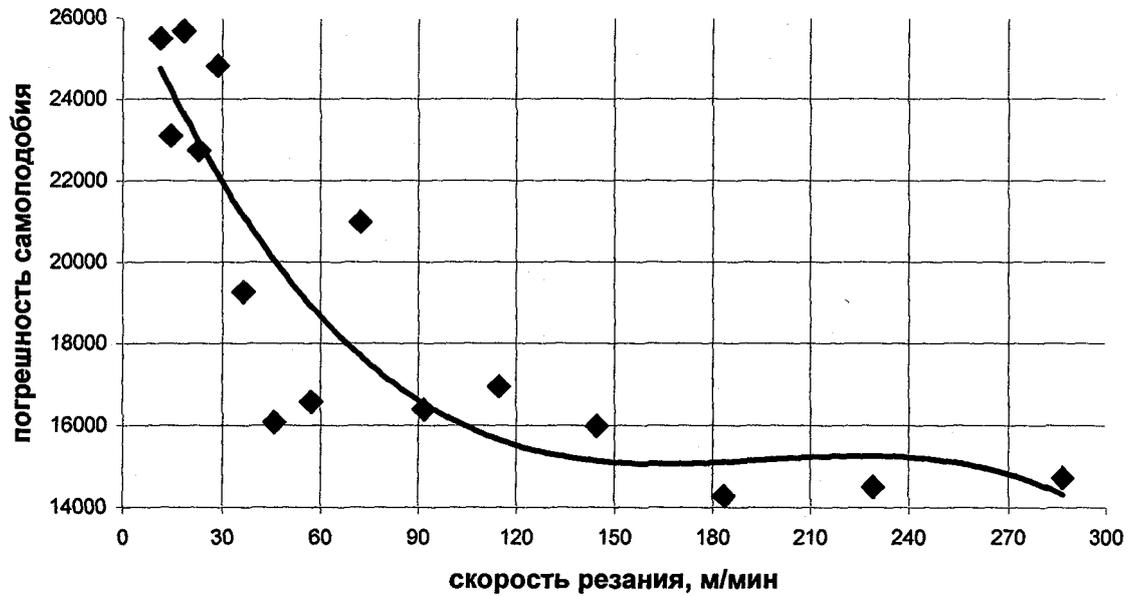


Рисунок 4.11. Зависимость погрешности самоподобия от скорости резания для Ст45,  $d=73$  мм,  $s=0,11$  мм/об,  $t=1$  мм, T15K6

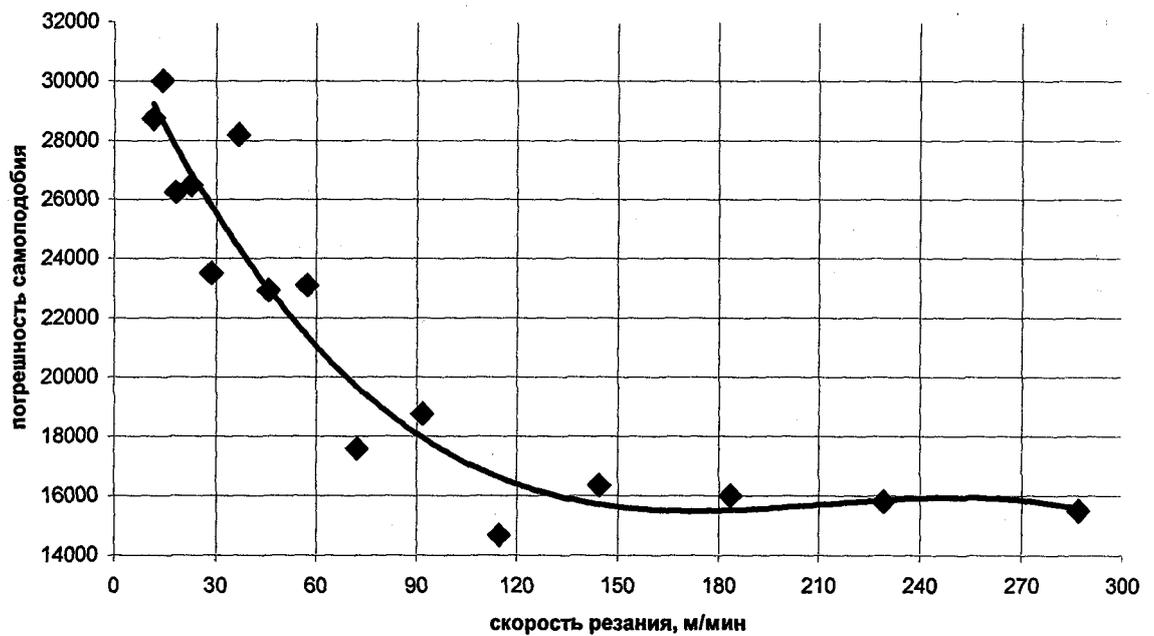


Рисунок 4.12. Зависимость погрешности самоподобия от скорости резания для У8,  $d=72$  мм,  $s=0,11$  мм/об,  $t=1$  мм, T15K6

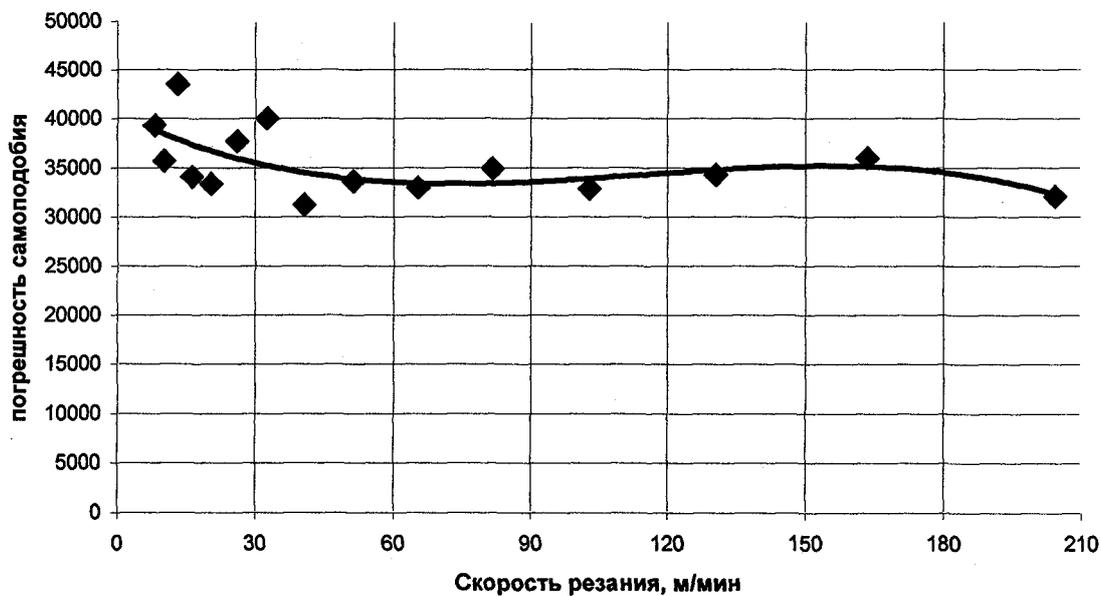


Рисунок 4.13. Зависимость погрешности самоподобия от скорости резания для титанового сплава марки 3М,  $d=52$  мм,  $s=0,11$  мм/об,  $t=0,5$  мм, ВК8

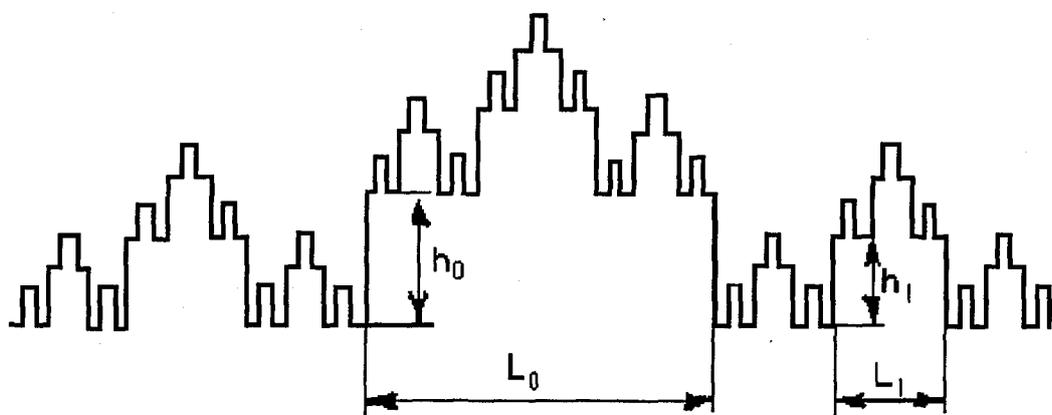


Рисунок 4.14. Модель канторовского профиля ( $L_i$ ,  $h_i$  – ширина и высота выступов  $i$ -го поколения канторовского профиля)

Таким образом, шероховатость  $R_a$  поверхностного слоя можно диагностировать по изменению динамических характеристик процесса формообразования: фрактальной размерности –  $D_0$ , информационной энтропии –  $H_1$ , погрешности самоподобия –  $\Delta$ .

#### **4.5. Фрактальный подход к формированию и контактному взаимодействию обработанных поверхностей**

В работе /52/ при высоких скоростях обработки предложен фрактальный метод формирования обработанной поверхности, учитывающий случайный характер их формирования. Для образования фракталов необходимо наличие высоко энергетических процессов при управляемом микро и макро разрушении с высокой интенсивностью формирования ( $10^5 - 10^9 \text{ с}^{-1}$ ), что якобы типично для шлифовальных и финишных станков, т.е. при скоростных видах обработки.

Далее, согласно автору /52/ для образования фракталов необходимы ударные волны растяжения – сжатия вследствие отражения бегущей волны и последующего отрыва слоя, толщина которого определяется свойствами, прежде всего, обрабатываемого материала. Такой вид разрушения назван отколом.

Однако приведенные значения фрактальной размерности  $D_0$  в таблице работы /52/ хотя и являются дробными, но имеют большие значения и требуют уточнений. Например, финишные и прецизионные станки имеют  $D_0 \approx 2,6 - 3,0$  соответственно. Известно /102/, что высокие значения  $D_0$  соответствуют хаотическим аттракторам.

Как было уже установлено ранее, процесс формообразования существенно определяется напряженно-деформированным состоянием в зоне

обработки, в свою очередь определяющим высоту неровностей  $R_a$  и наростообразование.

Поэтому важным является также изучение контактного взаимодействия и износа фрактальных поверхностей при трении.

В ряде работ /6,52/ показано, что шероховатость обработанной поверхности при резании является фрактальной. Существуют также модели /6,80/ трения для фрактальных поверхностей.

В предложенных моделях /6,52/ трение фрактальных поверхностей рассматривается на основе канторовского множества /102/ (рисунок 4.14). При этом предельное множество точек, соответствующих основаниям выступов рассматривается как канторовская пыль.

При рассмотрении таких задач, прежде всего, необходимо выявить самоподобие исследуемой шероховатой поверхности (см. раздел 4.4).

Фрактальность шероховатой поверхности определялась по разработанной методике на основе снятых с неё профилограмм. Причем профилограммы рассматривались как совокупность временных рядов. Наряду с  $D_0$  фрактальной размерностью, определялась и информационная энтропия.

На рисунках 4.1, 4.2 показана зависимость фрактальной размерности  $D_0$  шероховатости от скорости резания  $V$  при резании стали 45 и стали У8. Как видно из рисунков, за исключением низких скоростей,  $D_0$  является величиной постоянной, что свидетельствует о самоподобии шероховатости обработанной поверхности. Естественно в процессе резания могут действовать случайные факторы, которые следует рассматривать как выбросы.

На рисунке 4.15 приведена модель контактного взаимодействия шероховатых тел при трении (а) и модель шероховатости детали в виде канторовского профиля (б). Жесткость фрактальных неровностей принималась одинаковой.

Предлагаемая модель трения рассматривается как первое приближение и в основном учитывает деформационную составляющую силы трения, хотя в дальнейшем адгезионная составляющая может быть учтена на основе стержня Эйлера с грузом.

В этой связи предполагаемая модель исходит из того, что канторовский профиль взаимодействует (рисунок 4.15, а) с выступами другой поверхности, т.е. неровности движущегося контртела зацепляют неровности фрактальной поверхности. При этом, во-первых, возрастает сопротивление перемещению за счет увеличения величины отгиба неровности и возникновения силы упругости при деформации. При критической силе упругости и величине отгиба происходит динамическое (резкое) возвращение фрактальной неровности в прежнее состояние.

Анализ информационной энтропии и числовых значений фрактальной размерности показывает, что неровность теряет устойчивость и может находиться в колебательном режиме.

Учет  $P$  силы давления и возможного адгезионного контактного взаимодействия неровностей позволяет усложнить модель зацепления фрактальной неровности, сообщив ей определенную  $M$  массу.

Иначе говоря, упругая фрактальная неровность (канторовская пластина) вначале остается в вертикальном положении с массой. При росте массы груза (и отгиба пластины) будет совершаться работа  $F_T$  сил трения против сил упругости.

В результате при определенном отклонении пластины (либо соотношении  $F_T$  силы трения и  $F_c$  силы упругости), т.е. при превышении  $F_c > F_T$ , неровность возвращается в прежнее состояние и приводится в колебательное движение с вынужденной частотой –  $f_n$ . В первом приближении за  $f_n$  можно принимать частоту автоколебаний системы трения.

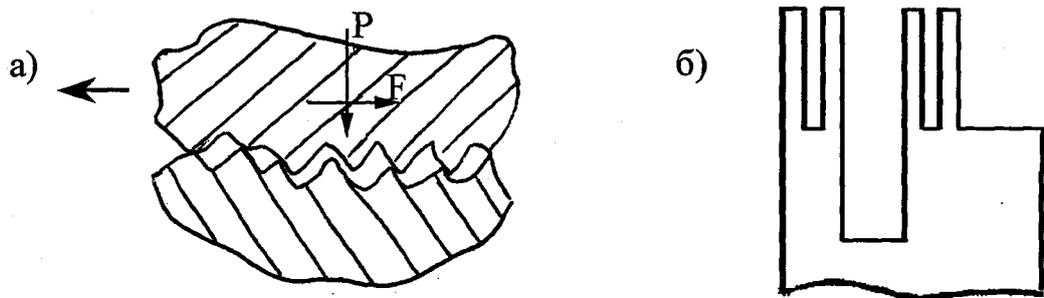


Рисунок 4.15. а - модель контактного взаимодействия шероховатых тел при трении;

б - канторовский профиль поверхности

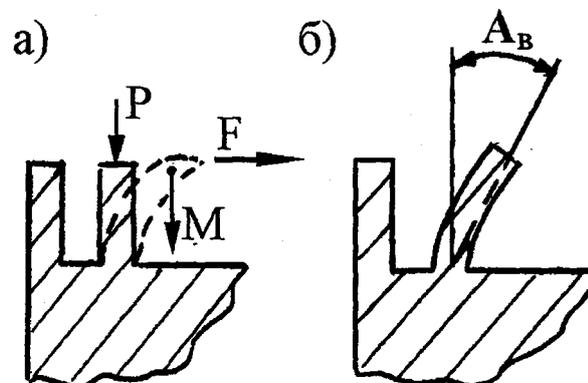


Рисунок 4.16. Модели нагружения фрактальной неровности:

а - канторовский профиль; б - модель раскочки упругой пластины (фрактальной неровности)

Расчет  $f_c$  собственных частот колебаний неровностей показывает, что  $f_c$  находится в пределах нескольких МГц, что определяется их высотой, твердостью материала (пределом упругости) и т.д. В этой связи, в зависимости от  $P$  силы контактного взаимодействия, адгезионной совместимости, неровность может находиться не только в автоколебательном режиме, но и в условиях резонанса с амплитудой  $A_B$ . В результате возможно усталостное разрушение неровности, что будет способствовать снижению силы трения во времени и воспроизводству шероховатости с более низкой фрактальной размерностью  $D_0$ .

На рисунке 4.16 показаны модели нагружения фрактальной неровности в виде упругой пластины канторовского профиля и колебательный режим пластины при трении.

Микроразрушение начальной фрактальной поверхности будет сопровождаться как изменением микрорельефа и снижением силы трения, так и  $D_0$  фрактальной размерности шероховатости и размеров частиц износа.

Рассмотренная модель трения и износа фрактальных поверхностей, естественно не учитывает различие в высоте неровностей в пределах базовой длины и не лишена других недостатков. Поэтому в дальнейшем эта модель должна получить ряд уточнений.

Как показали проведенные исследования большим значениям шероховатости  $R_a$  в зависимости от скорости резания  $V$  соответствуют и большие значения  $D_0$  фрактальной размерности, что говорит о более низкой устойчивости неровностей, превышающих среднестатистическую.

Проведенные исследования контактного взаимодействия фрактальных поверхностей позволяют указать некоторые пути снижения сил трения и износа деталей машин.

Во-первых, это оптимизация  $R_a$  по  $D_0$ , например, с использованием нейронных сетей либо генетических алгоритмов, во-вторых, это целена-

правленное формирование на поверхностях деталей фрактальных структур, подобных канторовскому множеству или ковру Серпинского, например виброупрочнением, то есть создания оптимального микрорельефа.

#### 4.6. Выводы

1. Фрактальная размерность шероховатости поверхности существенно зависит от обрабатываемого материала. Фрактальная размерность шероховатости поверхности стали У8 меньше, чем фрактальная размерность шероховатости поверхности стали 45. Таким образом, процесс формообразования при обработке стали У8 является более устойчивым.

2. Установлена зависимость фрактальной размерности шероховатости поверхности, информационной энтропии и погрешности самоподобия от скорости резания. Установлено, что данные характеристики шероховатости поверхности изменяются от скорости резания немонотонно.

3. Выявлена тесная корреляция между шероховатостью поверхности и информационными характеристиками формообразования. Поэтому параметры  $(D_0, H_1, \Delta)$  могут служить диагностирующими признаками при оценке шероховатости поверхностного слоя в процессе резания. Установленная связь шероховатости с информационными характеристиками позволяет определить оптимальную скорость резания  $V_{\text{опт}}$ , где шероховатость  $R_z$  является минимальной.

4. Предложена модель фрактальной поверхности в виде канторовского множества, а также модель контактного взаимодействия фрактальных поверхностей, что позволяет указать некоторые пути снижения сил трения и износа деталей машин.

## ГЛАВА 5. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА

Управление шероховатостью обработанной поверхности достигается за счет разработки автоматизированных систем диагностирования параметров шероховатости ( $R_z$ ,  $R_a$ ) в процессе резания. Предложены методы диагностики шероховатости обработанной поверхности по частоте стружкообразования и информационной энтропии. Разработаны структура обучаемой нейронной сети (модель процесса резания) и структура нейронной сети динамической диагностики и управления параметра шероховатости  $R_a$ .

### 5.1. Диагностика качества поверхности по частоте стружкообразования

Экспериментальные данные позволили выявить закономерности образования шероховатости обработанной поверхности. В частности установлено (см. раздел 3.), что оптимальные параметры шероховатости поверхности существенно определяются деформационными характеристиками срезаемого слоя, в частности, частотой стружкообразования. Поэтому частота стружкообразования может выступать в качестве диагностирующего критерия, характеризующего изменение шероховатости поверхности при изменении условий резания:

$$R_z = f(f_{\text{стр}}). \quad (5.1)$$

Как показывают исследования, в мгновенном спектре виброакустической эмиссии (ВЭ), генерируемом при резании, имеются частоты, несущие информацию о частоте стружкообразования.

Поэтому методами спектрального анализа (как аппаратными, так и программными) частоту стружкообразования можно выделить из сигнала виброакустической эмиссии. Это позволяет диагностировать шероховатость поверхностного слоя деталей в реальном режиме времени.

Измерение и регистрацию сигналов виброакустической эмиссии можно осуществлять на основе датчиков, у которых в качестве чувствительного элемента используется пьезокерамика, обладающая высокой прочностью, стабильностью свойств, малой гигроскопичностью. Для проведения исследований были использованы два пьезоэлектрических датчика колебаний KD 35.

Важным является выбор способа и места крепления датчиков. Используемые датчики имеют резьбовые отверстия и комплект переходников для их установки, поэтому в державке резца были выполнены два резьбовых отверстия М5. Отверстия для крепления датчиков были выполнены на перпендикулярных гранях державки резца (снизу и справа) на расстоянии 40 мм от плоскости резания (рисунок 5.1).

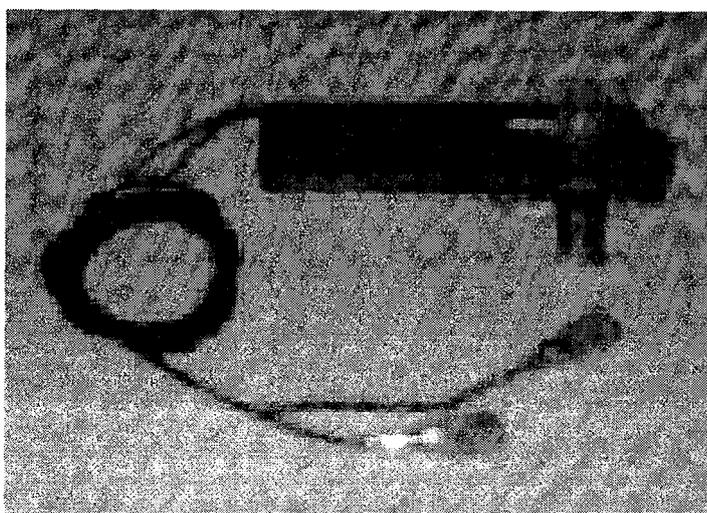


Рисунок 5.1. Фотография сборного резца с установленными на нем двумя датчиками колебаний

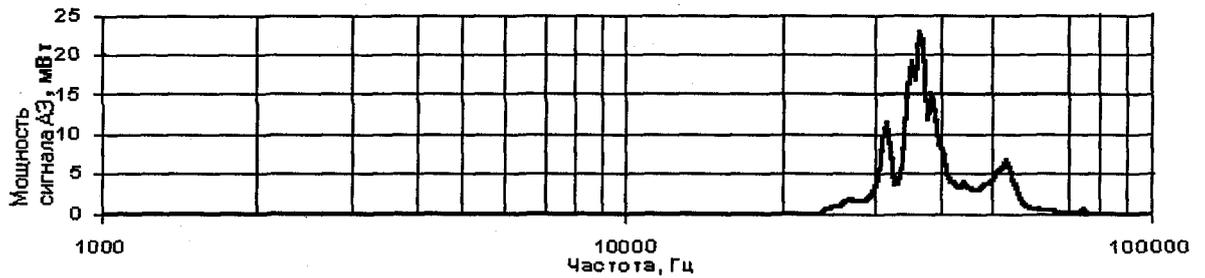
Более близкое расположение датчиков к зоне резания усилит опасность механического контакта корпусов преобразователей со стружкой. Расположение датчиков на перпендикулярных плоскостях позволит изучить динамическую картину пространственного распределения напряжений в объеме инструмента путем двухкоординатного измерения поверхностных волн Рэлея. Датчики крепятся на равном удалении от ребер резца, где в наименьшей степени сказываются краевые эффекты и, следовательно, поверхностные волны терпят минимум искажений.

Сигнал виброакустической эмиссии при резании охватывает широкий диапазон частот. Частота стружкообразования на режимах обработки, применяемых в производстве, находится в области  $10^3 - 10^5$  Гц. Поэтому встает задача выделения частоты стружкообразования на фоне частот от других процессов (рабочие движения станка, работа двигателя и другие).

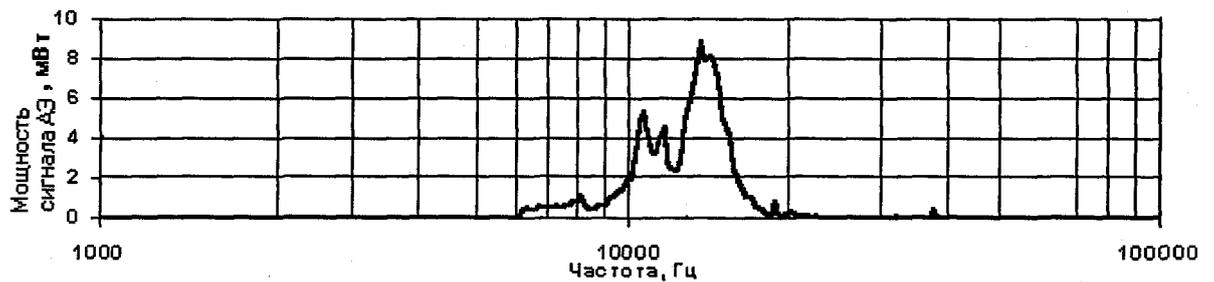
В качестве платы сбора данных используется плата сбора и обработки аналоговой информации ЛА – н10м, имеющая следующие характеристики: 8-ми разрядный АЦП, 2 синхронных канала, наибольшую частоту дискретизации 100 МГц, программируемый коэффициент усиления, 128 кБ ОЗУ. Плата сбора данных выполнена в виде платы расширения для IBM – совместимой ПЭВМ. Работа с платой сбора данных осуществляется с помощью специально написанной программы, которая позволяет осуществлять запись электрического сигнала ВЭ по двум каналам, используя три режима синхронизации (внутренний, по другому каналу, по внешнему источнику синхронизации).

Чтобы по регистрируемому сигналу ВЭ определить частоту стружкообразования, необходимо в спектре сигнала ВЭ определить наиболее мощную гармонику, предварительно исключив мощные шумы от силовых приводов станка (полоса частот ниже 1000 Гц) (рисунок 5.2).

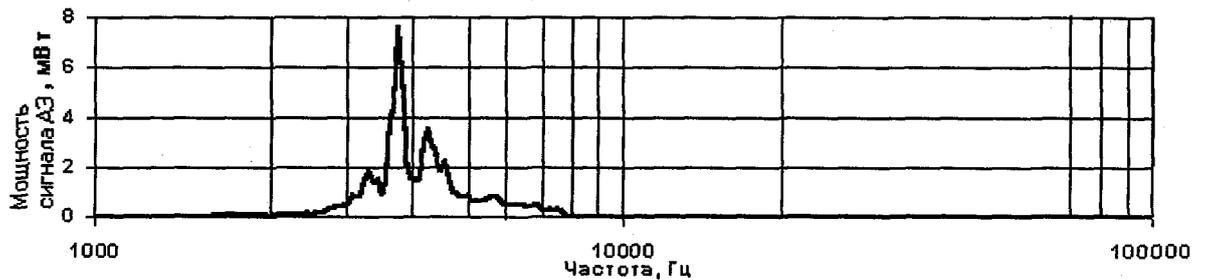
а)



б)



в)



г)

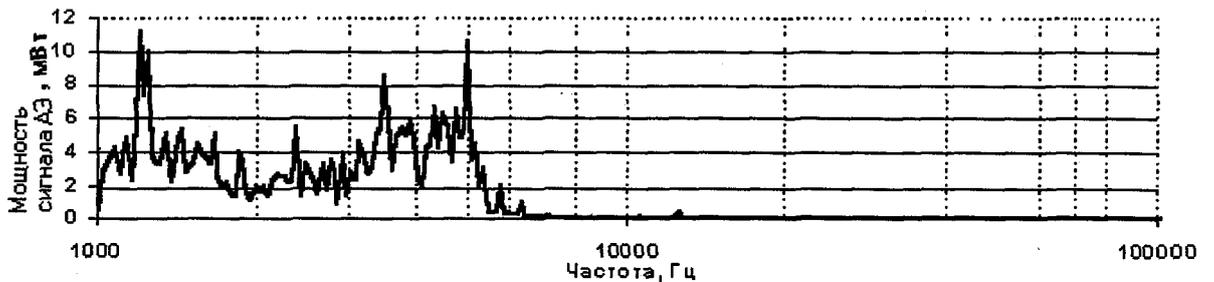


Рисунок 5.2. Спектрограммы сигнала ВЭ при обработке стали У8

(инструмент Т15К6,  $s = 0,21$  мм/об,  $t = 1$  мм): $v = 252$  м/мин,  $R_a = 2,3$  мкм,  $f_{стр} = 37,167$  кГц (а); $v = 153$  м/мин,  $R_a = 4,7$  мкм,  $f_{стр} = 13,739$  кГц (б); $v = 73$  м/мин,  $R_a = 7,1$  мкм,  $f_{стр} = 3,816$  кГц (в); $v = 33$  м/мин,  $R_a = 9,4$  мкм,  $f_{стр}$  неопределена (г).

Основная сложность при определении частоты стружкообразования заключается в том, что  $f_{стр}$  – величина не постоянная, а непрерывно «плавающая» вблизи своего наиболее вероятного значения (см. рисунок 5.2. а - в). Это объясняется тем, что мгновенная скорость резания непостоянна, непостоянна и скорость деформации обрабатываемого материала, которая существенно влияет на образование нового элемента стружки.

Переменность мгновенной скорости резания обусловлена тем, что при колебаниях режущей кромки инструмента скорость движения инструмента относительно детали периодически то увеличивает, то уменьшает скорость резания, при этом периодически изменяется и глубина резания.

В результате, количество металла, деформируемого за единицу времени, и скорость деформации непостоянны, что влияет на частоту стружкообразования. Поэтому на практике для вычисления частоты стружкообразования по спектру мощности ВЭ целесообразно использовать первый статистический момент:

$$f_{стр.} = \exp(\mu_{ln стр.}), \quad (5.2)$$

где  $\mu_{ln}$  – математическое ожидание частоты в логарифмической шкале спектра мощности, рассчитываемое, в свою очередь, следующим образом:

$$\mu_{ln стр.} = \frac{\sum (P_i \cdot \ln(f_i))}{\sum P_i}, \quad (5.3)$$

где  $f_i$  – частотные диапазоны спектра (см. рисунок 5.2);  $P_i$  – мощность сигнала ВЭ, излучаемого в  $i$ -том частотном диапазоне.

Частота стружкообразования, определенная методом виброакустической эмиссии, верифицировалась частотой стружкообразования  $f_{стр}$ , определенной по формуле (3.3). Расхождение составляет 10 – 15 %.

Для более достоверной диагностики процесса образования элементов стружки при резании и контроля высоты микронеровностей на обработан-

ной поверхности полезно также рассчитать два следующих статистических момента спектра мощности ВЭ. Это среднеквадратичное отклонение частоты стружкообразования (в логарифмической шкале):

$$\sigma_{\ln \text{ стр.}} = \sqrt{\frac{\sum (P_i \cdot (\ln(f_i) - \mu_{\ln \text{ стр.}})^2)}{\sum P_i}}; \quad (5.4)$$

и асимметрию (в логарифмической шкале):

$$\alpha_{\ln \text{ стр.}} = \frac{\sum (P_i \cdot (\ln(f_i) - \mu_{\ln \text{ стр.}})^3)}{\sigma^3 \cdot \sum P_i}. \quad (5.5)$$

Для контроля параметра шероховатости в условиях интенсивных возмущений процесса резания (образование и срыв нароста) следует применять диагностические модели. Такие модели являются основой систем, реализующих поисковый алгоритм адаптивного управления технологическими процессами, в которых реальный процесс и модель процесса располагаются в контуре управления последовательно, а не параллельно (см. рисунок 5.3).

В качестве вектора  $\bar{\psi}(\tau)$  физически измеримой информации о процессе используем сигнал виброакустической эмиссии (ВЭ), излучаемой в процессе резания.

Как уже отмечалось, в мгновенном спектре виброакустической эмиссии имеются частоты, несущие информацию о частоте образования элементов стружки  $f_{\text{стр.}}$ .

Таким образом, задача построения диагностической модели процесса стружкообразования и образования микронеровностей на обработанной поверхности сводится к определению вида зависимости

$$R_a(\mu_{\ln \text{ стр.}}, \sigma_{\ln \text{ стр.}}, \alpha_{\ln \text{ стр.}}).$$

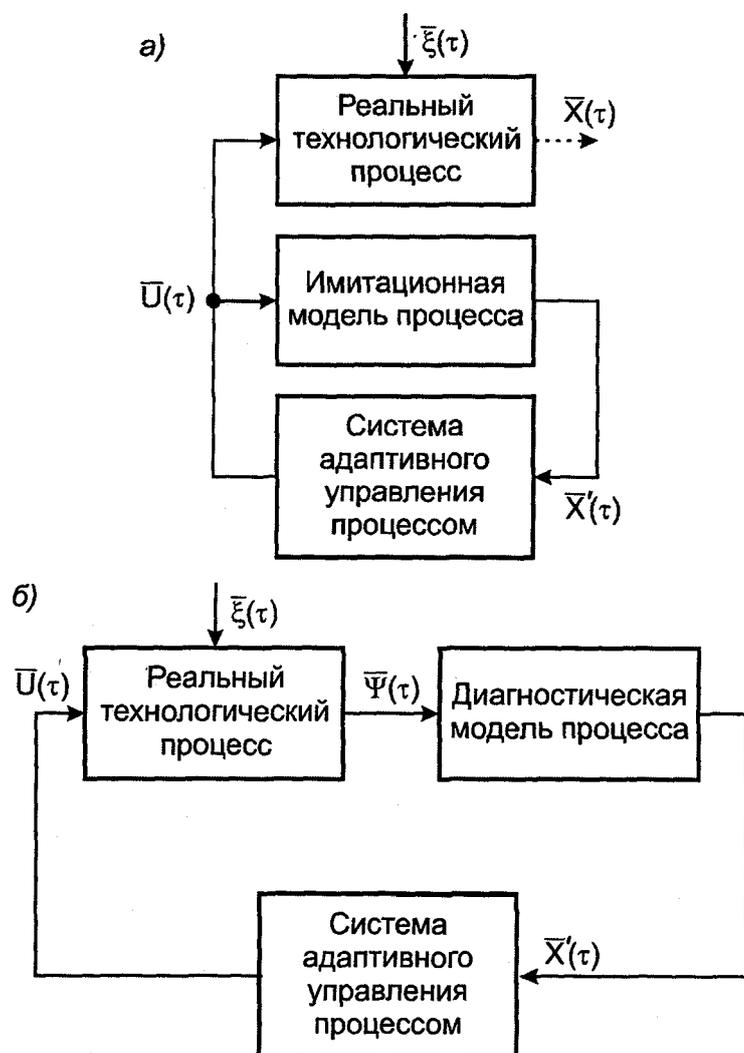


Рисунок 5.3. Схемы построения систем адаптивного управления технологическим процессом:  $\bar{U}(\tau)$  – вектор управления;  $\bar{\xi}(\tau)$  – вектор возмущающих воздействий;  $\bar{X}(\tau)$  – вектор выходных параметров процесса;  $\bar{X}'(\tau)$  – вектор предполагаемых значений выходных параметров процесса;  $\bar{\Psi}(\tau)$  – вектор физически измеримой информации о процессе

Однако для некоторых режимов обработки даже такая глубокая (вплоть до третьего момента) статистическая обработка не позволяет достоверно определить частоту стружкообразования. Причиной тому является появление на низких скоростях резания, в зоне интенсивного наростообразования, в сигнале ВЭ непериодических хаотических компонент.

## 5.2. Диагностика шероховатости обработанной поверхности по информационной энтропии

В процессе течения с наростом устойчивый процесс формобразования нарушается хаотическими возмущениями, вызванными вихревым характером движения обрабатываемого материала в зоне резания (см. главу 3) /39/, а также резонансом частоты собственных колебаний неровностей  $f_c$  с амплитудой  $A_b$  (см. рисунок 4.16).

Спектральный анализ позволяет определить частоты колебаний при периодическом и квазипериодическом режиме, однако, спектры хаотического сигнала несут мало полезной диагностической информации (см. рисунок 5.2. г).

Доказательством того, что образование нароста приводит к хаотизации динамики процесса резания, может служить вычисление информационной энтропии  $H_1$ . Числовое значение энтропии является количественной характеристикой степени хаотичности динамической системы.

Если энтропия стремится к нулю, то система является полностью детерминированной. Так будет в случае регулярных, устойчивых процессов. Энтропия  $H_1$  системы с хаотической динамикой положительна, но имеет конечное значение. Для истинно случайных процессов энтропия неограниченно велика.

На рисунке 4.8. наглядно видно, что значение информационной энтропии  $H_1$  шероховатости поверхности, а также сигнала ВЭ, зафиксированного при точении, заметно увеличивается при скоростях резания, соответствующих процессу интенсивного наростообразования ( $v \approx 30$  м/мин).

Для того чтобы выяснить насколько хаотичность динамики процесса резания влияет на шероховатость получаемой поверхности, рассмотрим график зависимости  $R_a$  от скорости  $v$  резания (см. рисунок 4.8). Из графика видно, что зависимость  $R_a(v)$  носит немонотонный характер. Шероховатость существенно увеличивается в области низких ( $v < 30$  м/мин) скоростей резания. Причем характер зависимости  $R_a(v)$  достаточно близко повторяет поведение функции критерия хаотичности  $H_1(v)$ . То есть, можно утверждать, что увеличение шероховатости обработанной поверхности в области низких скоростей резания связано с хаотизацией динамики процесса формообразования, вызванной процессом интенсивного наростообразования, который сопровождается вихревым нерегулярным характером движения обрабатываемого материала в зоне резания и повторяющимися через неравномерные промежутки времени изменениями силы резания, вызванными срывом нароста.

Для идентификации систем с хаотической динамикой можно воспользоваться оцениванием таких количественных характеристик, как описанная выше информационная энтропия  $H_1$ , фрактальная размерность  $D_0$  и погрешность самоподобия  $\Delta$ .

В качестве временного ряда используем все тот же сигнал виброакустической эмиссии, используемый для определения частоты  $f_{стр}$  стружкообразования.

В совокупности с описанными ранее статистическими моментами частоты стружкообразования  $\mu_{ln стр.}$ ,  $\sigma_{ln стр.}$  и  $\alpha_{ln стр.}$ , критерии хаотичности динамики формообразования  $H_1$ ,  $D_0$  и  $\Delta$  образуют вектор диагностических

признаков  $\bar{\Psi} (\mu_{in\ cnp.}, \sigma_{in\ cnp.}, \alpha_{in\ cnp.}, H_1, D_0, \Delta)$ . Причем для режимов точения, характеризующихся устойчивым резанием ( $H_1$  стремится к 0), диагностика шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности производится с помощью частоты стружкообразования (моменты  $\mu_{in\ cnp.}$ ,  $\sigma_{in\ cnp.}$  и  $\alpha_{in\ cnp.}$ ), а для режимов, сопровождающихся хаотическими явлениями в зоне резания – по фрактальным характеристикам сигнала ВЭ (величины  $H_1$ ,  $D_0$  и  $\Delta$ ).

### **5.3. Разработка нейронно-сетевой модели управления шероховатостью поверхностного слоя**

#### **5.3.1. Имитационная модель процесса стружкообразования и образования микронеровностей на обработанной поверхности**

Для технологического обеспечения оптимальной шероховатости поверхности и качественной ее диагностики в процессе изготовления детали важно знать взаимосвязь между критериями шероховатости поверхности и технологическими факторами (методами и режимами резания, геометрии, износа и материала режущего инструмента и др.), а также между физико-механическими свойствами обрабатываемого материала.

Как уже отмечалось, в последние годы из-за простоты реализации широкое применение получили методы диагностики выходных параметров резания, основанные на целенаправленном синтезе приближенных эмпирических моделей процесса механической обработки, устанавливающих взаимосвязь того или иного выходного критерия процесса с основными технологическими факторами.

Приближенные эмпирические зависимости значительно выигрывают в простоте по сравнению с аналогичными точными математическими моделями. Однако удовлетворительная точность эмпирических зависимостей достигается лишь в том случае, если закон аппроксимации известен зара-

нее или был «угадан» путем перебора различных комбинаций алгебраических функций. К сожалению, очень часто закон заранее неизвестен или слишком сложен для синтеза в виде набора простейших функций.

Для иллюстрации этого утверждения исследуем эмпирическую зависимость (1.4).

Трехмерный график данной зависимости от скорости  $v$  резания и подачи  $s$  (для  $t = 1$  мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $r = 0,5$  мм), рассчитанный аналитически, показан на рисунке 5.4.

Как видно из рисунка зависимость монотонна относительно обеих переменных  $v$  и  $s$ , что и следовало ожидать при применении степенных законов аппроксимации с показателями степени меньше единицы.

Проведя экспериментальные исследования по точению заготовки из стали У8 резцом из твердого сплава Т15К6 получим несколько другой график зависимости (см. рисунок 5.5).

Из графика видно, что реальная зависимость  $R_a(v,s)$  немонотонна относительно скорости  $v$  резания и имеет характерный максимум при режимах резания в зоне интенсивного наростообразования.

Сравнивая графики на рисунках 5.4 и 5.5 видим, что закон аппроксимации для выражения (1.4) выбран некорректно и помимо степенных зависимостей, вероятно, следует использовать комбинации каких-либо других нелинейных алгебраических функций.

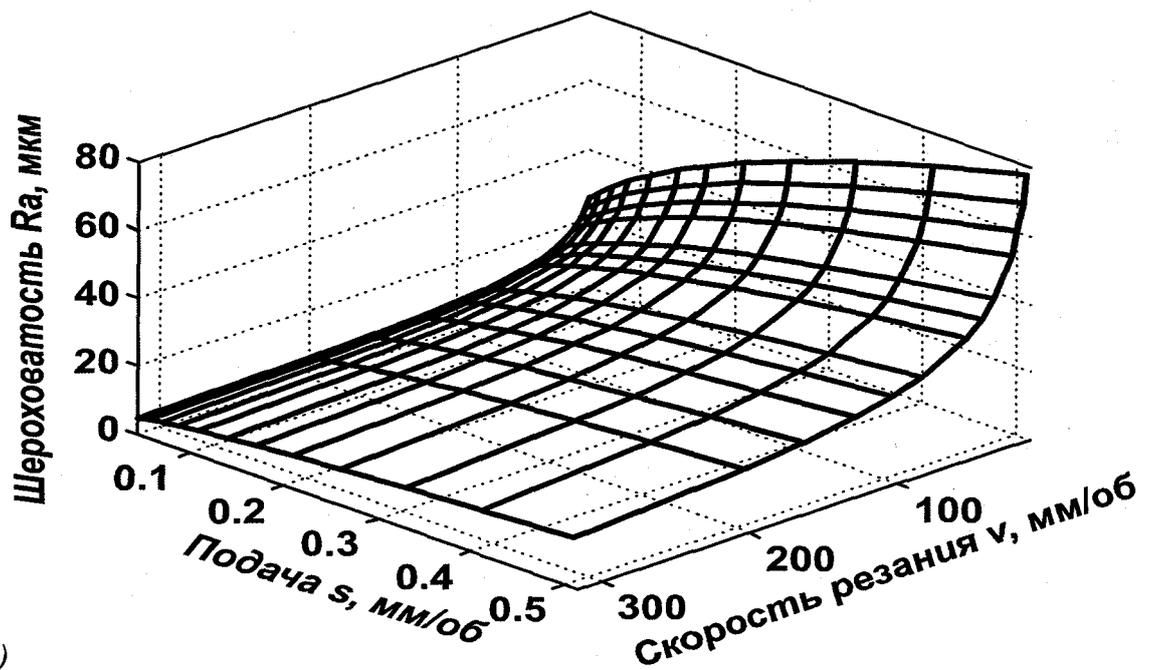
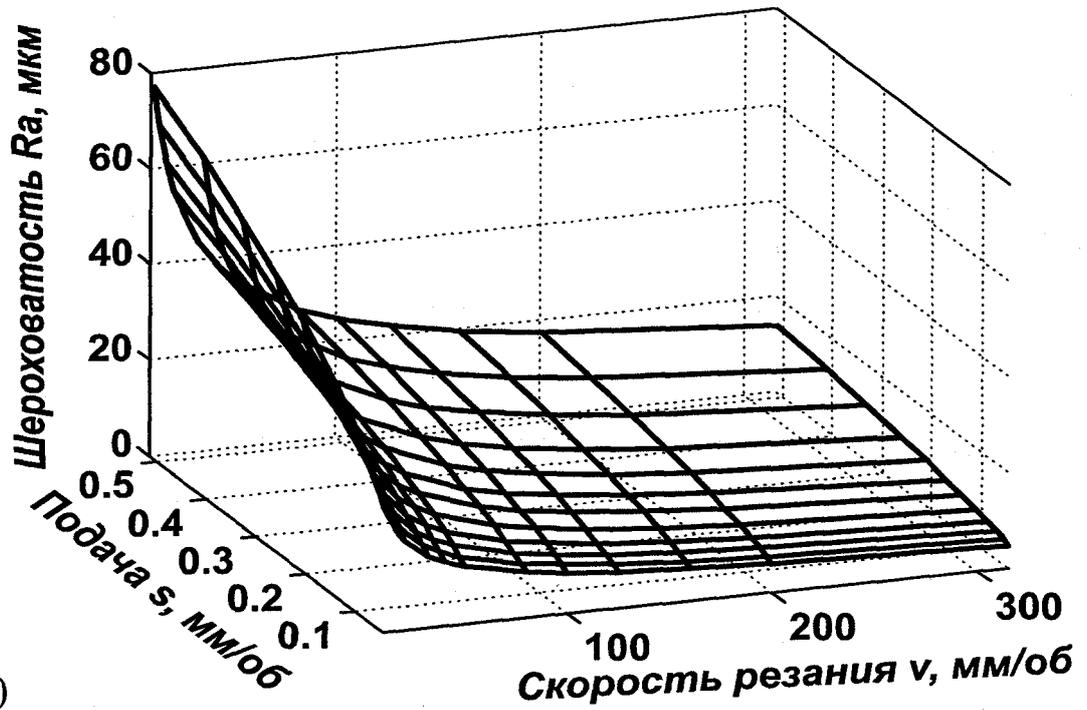


Рисунок 5.4. График зависимости (в двух разных аспектах) параметра шероховатости  $R_a$  от скорости  $v$  резания и подачи  $s$ , рассчитанный по формуле (1.4) для  $t = 1$  мм,  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $r = 0,5$  мм

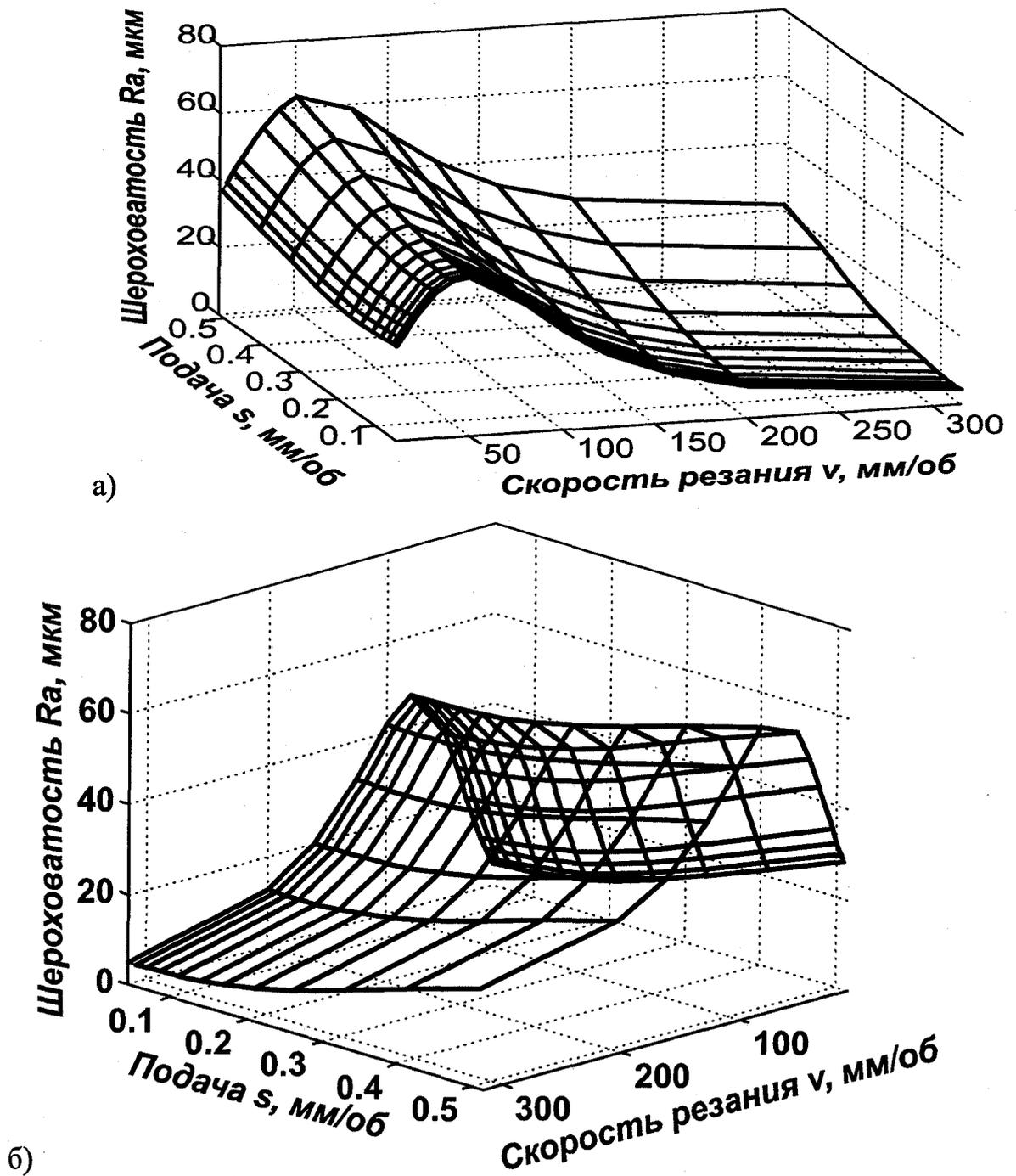


Рисунок 5.5. График зависимости (в двух разных аспектах) параметра шероховатости  $R_a$  от скорости  $v$  резания и подачи  $s$ , полученный экспериментальным путем для стали У8, твердосплавного резца Т15К6,  $t = 1 \text{ мм}$ ,  $\varphi_1 = 45^\circ$  и  $r = 0,5 \text{ мм}$

По-видимому, наиболее перспективным направлением выявления законов, устанавливающих взаимосвязь показателей шероховатости поверхности с основными технологическими факторами, является разработка информационных моделей /42, 43/ на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), которые благодаря своим аппроксимирующим свойствам и высокому быстродействию, находят все большее применение.

Утверждение, что нейронные сети – наилучший аппроксиматор функций, имеющее место во многих работах по теории и применению нейронных сетей, можно объяснить следующим образом.

Для классической теории аппроксимации, являющейся основой вычислительной математики для однопроцессорных и многопроцессорных ЭВМ с архитектурой фон-Неймана, аппроксимируемая функция имеет вид /9/:

$$y(x) = \sum_i \alpha_i \psi_i(x). \quad (5.6)$$

Здесь набор функций  $\psi_i(x)$ , как правило, выбирается априори, исходя из интересов автора конкретного метода аппроксимации и некоторых свойств данных функций, доказываемых и используемых в процессе аппроксимации.

Для нейронных сетей базовое выражение для аппроксимируемой функции выглядит несколько иначе, например, для трехслойной нейронной сети с последовательными связями:

$$y(x) = \psi \left( \sum_i \alpha_i \psi \left( \sum_j \alpha_{ij} \psi \left( \sum_k \alpha_{kj} x_k \right) \right) \right). \quad (5.7)$$

В последнем выражении структура эквивалентных базовых функций  $\psi_i$  представлена в нейросетевом логическом базисе с множеством коэффициентов, которые являются настраиваемыми в процессе поиска наилучшей аппроксимации.

Важной особенностью ИНС является то, что для их успешного применения достаточно предположения о существовании некоторой функциональной зависимости между входными воздействиями и реакцией объекта на эти воздействия. При этом обучение сети проводится по некоторым формальным правилам, не требующим тщательного анализа характеристик. Одним из строгих математических результатов в области аппроксимации функций с помощью нейронных сетей является доказательство /9/ возможности аппроксимации произвольной непрерывной функции нейронной сетью с наперед заданной точностью.

Опираясь на выражение (1.4) примем основными технологическими факторами, определяющими шероховатость поверхности при обработке резанием металлическим инструментом, следующие величины: скорость  $v$ , подачу  $s$  и глубину  $t$  резания, а также радиус  $r$  закругления вершины резца и вспомогательный угол  $\varphi_1$  в плане. Для определения вида зависимости  $R_a(v, t, s, \varphi_1, r)$  сформируем нейронную сеть встречного распространения (см. рисунок 5.6).

Входной слой служит для приведения входных аргументов сети к единому масштабу. Так как применяемые на практике величины  $v, t, s, \varphi_1$  и  $r$  имеют стандартизированные значения и достаточно равномерно заполняют интервал допустимых режимов резания, то наиболее оптимальным вариантом входного слоя являются нейроны с линейной активационной функцией, производящих линейную нормировку входных данных. Приведение к единому масштабу обеспечивается нормировкой каждой переменной на диапазон разброса ее значений.

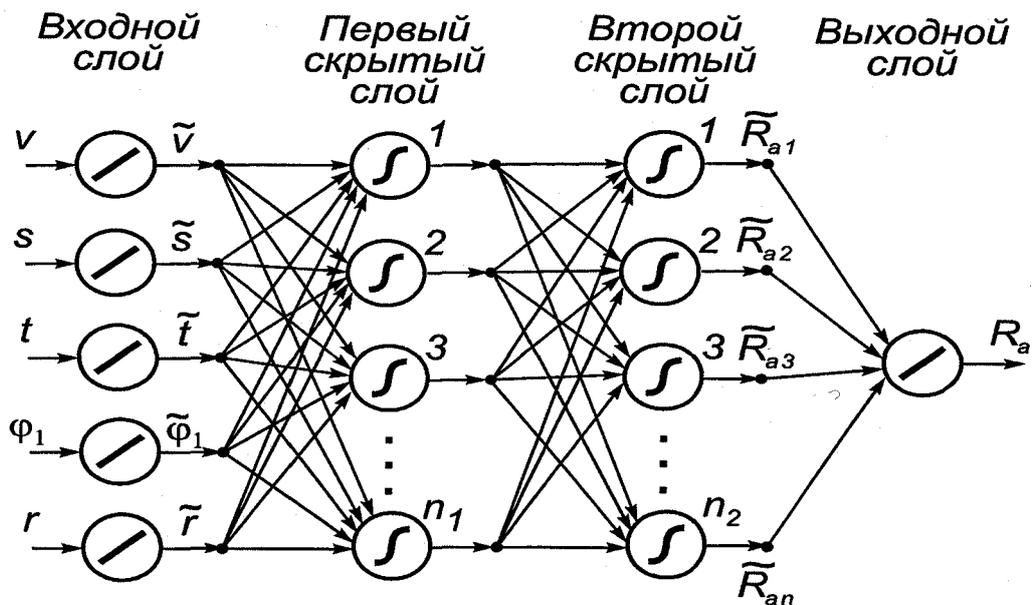


Рисунок 5.6. Структура нейронной сети, обучаемой для диагностирования параметра  $R_a$  шероховатости по элементам  $v$ ,  $s$ ,  $t$  режима резания и геометрическим характеристикам  $r$ ,  $\phi_1$  режущего инструмента

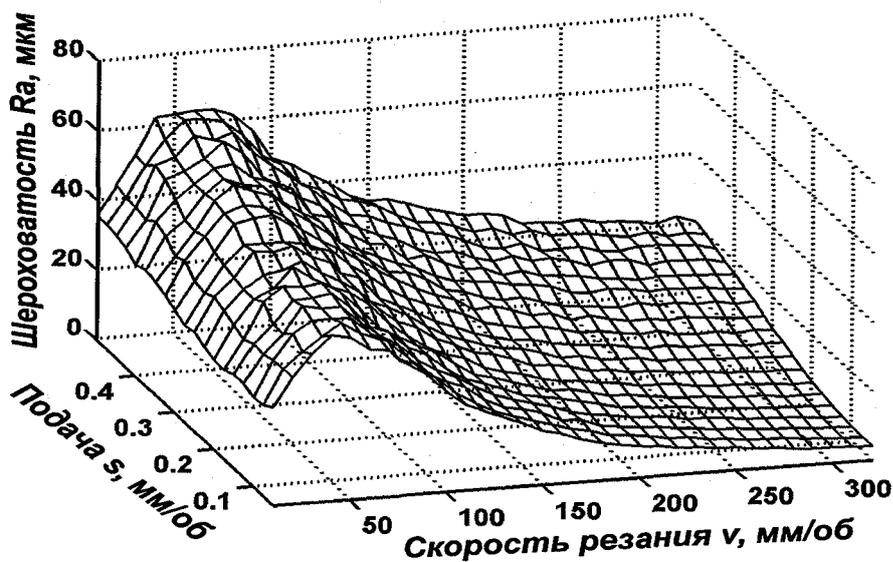


Рисунок 5.7. График зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от скорости  $v$  резания и подачи  $s$  ( $t = 1$  мм,  $\phi_1 = 45^\circ$  и  $r = 0,5$  мм), полученный при моделировании процесса резания на обученной нейронной сети

Например, для скорости  $v$  резания используем линейное преобразование в единичный отрезок  $\tilde{v} \in [0, 1]$ :

$$\tilde{v} = \frac{v - v_{\min}}{v_{\max} - v_{\min}}, \quad (5.8)$$

где  $v_{\min}$  и  $v_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значение аргумента  $v$  для всех содержащихся в обучающей выборке векторов  $[v, t, s, \varphi_1, r]$ .

Аналогичные линейные преобразования используем и для других входных аргументов сети.

Выходной слой служит для обратного линейного преобразования – масштабирования нормированной величины  $\tilde{R}_a \in [0, 1]$  к общепринятому значению параметра шероховатости  $R_a$ , заданному в микрометрах. Так как количество входов у выходного нейрона (см. рисунок 5.6) обычно бывает больше одного, то для масштабирования выходного значения  $R_a$  целесообразно использовать функцию взвешенной суммы:

$$R_a = w_1 \tilde{R}_{a1} + w_2 \tilde{R}_{a2} + w_3 \tilde{R}_{a3} + \dots + w_n \tilde{R}_{an}, \quad (5.9)$$

где  $n$  – количество нейронов в во втором скрытом слое;  $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$  – весовые коэффициенты ( $w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n = R_{a \max}$ , где  $R_{a \max}$  – максимальное значение  $R_a$  для всех содержащихся в обучающей выборке образов).

Для упрощения алгоритма обучения используем фиксированные значения весовых коэффициентов  $w_1 = w_2 = w_3 = \dots = w_n = (1/n) \cdot R_{a \max}$ , что приводит функцию (5.9) к выражению масштабированного среднего арифметического.

Кроме входного и выходного у сети присутствуют два скрытых слоя с числом нейронов  $n_1$  и  $n_2$  соответственно. Нейроны скрытых слоев имеют сигмоидную логистическую активационную функцию.

Нет строго определенной процедуры для выбора количества нейронов и количества скрытых слоев в сети. Размер и структура сети должны соответствовать существу исследуемого явления.

Чем больше количество нейронов и слоев, тем шире возможности сети, тем медленнее она обучается и работает и тем более нелинейной может быть зависимость вход-выход. Количество нейронов и слоев связано со сложностью задачи, с количеством данных для обучения, с требуемым количеством входов и выходов сети. Были попытки записать эмпирические формулы для числа слоев и нейронов, но применимость формул оказалась очень ограниченной.

Если в сети слишком мало нейронов или слоев, то сеть не обучится и ошибка при работе сети останется большой. Также в этом случае на выходе сети не будут передаваться резкие колебания аппроксимируемой функции  $R_a(v, t, s, \varphi_l, r)$ .

Превышение требуемого количества нейронов тоже мешает работе сети. Если нейронов или слоев слишком много, то сеть переобучится – выходной вектор будет передавать незначительные и несущественные детали в изучаемой зависимости, например, шум или ошибочные данные. Зависимость выхода от входа окажется резко нелинейной, выходной вектор будет существенно, но и непредсказуемо меняться при малом изменении входного вектора. Такая сеть будет неспособна к обобщению; в области, где нет или мало известных точек функции  $R_a(v, t, s, \varphi_l, r)$  выходной вектор будет случаен и непредсказуем, не будет адекватен решаемой задаче.

Для обеспечения требуемой точности и обобщающей способности можно использовать нейронную сеть с двумя (или более) скрытыми слоями, размерность которых меньше, чем при использовании одного скрытого слоя. Однако нейронные сети, которые имеют несколько скрытых слоев, обучаются значительно медленнее.

Поскольку на начальном этапе анализа свойства аппроксимируемого закона обычно не бывают хорошо известны, выбор архитектуры нейронной сети является непростой задачей и часто связан с длительным процессом интуитивного выбора на основе перебора различных вариантов /9/. В нашем случае, имея нейронную сеть с двумя скрытыми слоями, состоящими соответственно из  $n_1$  и  $n_2$  нейронов, и задавшись условием на минимальное и максимальное количество нейронов в слоях  $1 \leq n_1 \leq 16$  и  $0 \leq n_2 \leq 16$ , получим  $16 \times 17 = 272$  возможных варианта архитектуры нейронной сети. Если учесть, что обучение и тестирование каждого варианта сети занимает весьма продолжительное время, то весь процесс нахождения оптимальной архитектуры методом простого перебора может затянуться на неопределенно долгий срок.

### 5.3.2. Генетический алгоритм синтеза архитектуры нейронной сети

Существенно облегчить и ускорить процесс синтеза архитектуры многослойной сети встречного распространения позволяет применение генетических алгоритмов. В качестве искомым величин примем оптимальные значения числа нейронов в скрытых слоях  $n_1$  и  $n_2$  разрабатываемой сети (см. рисунок 5.6).

Разработка структуры хромосом производится так, чтобы гены в одних и тех же локусах хромосом являлись гомологичными, так как это упрощает выполнение генетических операторов кроссинговера и мутации. Число генов в хромосоме равно двум. Ген  $g_1$  соответствует первому скрытому слою, а ген  $g_2$  – второму. Структура связей между двумя соседними слоями соответствует полному двудольному графу. Значением гена  $g_i$  является число нейронов в  $i$ -том скрытом слое. Если  $g_i = 0$ , то этот слой исключается из рассмотрения.

Основными генетическими операторами являются операторы кроссинговера и мутации. Оператор кроссинговера выполняется следующим образом. Пусть имеются две родительские хромосомы  $H_1$  и  $H_2$ . Последовательно просматриваются локусы хромосом и, с вероятностью  $P_K$ , осуществляется обмен генами в текущем локусе. Обмен завершается после просмотра всех локусов, в результате получаются две хромосомы  $H'_1$  и  $H'_2$ .

Процедура мутации осуществляется следующим образом: последовательно просматриваются локусы и с вероятностью  $P_M$  ген  $g_i \in H_i$  приобретает новое значение в диапазоне  $0 \leq g_i \leq 16$ .

Для организации генетического поиска формируется исходная популяция особей:  $P_H = \{H_k \mid k = 1, 2, \dots, M\}$ , где  $M$  – размер популяции. Популяция ПИ представляет собой репродукционную группу индивидуальностей, любые из которых могут размножаться, выступая в роли родителей. В алгоритме используется принцип случайного формирования исходной популяции, гены  $g_1$  и  $g_2$  принимают случайные значения на отрезке  $[0, 16]$ .

Для обучения нейронной сети также используем генетические алгоритмы. В качестве независимой переменной выбираем  $p = \begin{pmatrix} W \\ \Theta \end{pmatrix}$  – набор весовых коэффициентов и пороговых уровней сети. Целевой функцией служит функция ошибки  $E(p)$ . Обучение сети с помощью генетических алгоритмов состоит в следующем:

1. В памяти создается некоторое количество нейронных сетей (популяция) с различными значениями  $p$ .
2. Пошагово моделируется развитие популяции в соответствии с генетическим алгоритмом (мутации, гибель, размножение).
3. Каждые несколько итераций в популяции выбирается точка с лучшим значением  $E(p)$ . Если значение целевой функции в этой точке достаточно мало, алгоритм завершается.

Для реализации указанных процедур формируются две выборки примеров:  $V_O$  – обучающая выборка и  $V_T$  – тестирующая выборка. На выборке  $V_O$  производится обучение нейронной сети с оптимизацией показателя  $E(p)$ , при этом осуществляется поиск значений весов для всех скрытых нейронов и параметров функций активации. На выборке  $V_T$ , после обучения сети, осуществляется проверка качества обучения.

Положительными качествами применения генетических алгоритмов при обучении нейронных сетей являются большая вероятность нахождения глобального минимума, неподверженность «застреванию» в локальных минимумах целевой функции, а также массовый параллелизм при обработке – особи в популяции функционируют независимо, расчет значений целевой функции, гибель, мутации осуществляются независимо для каждой особи.

Недостатком генетических алгоритмов при обучении нейронных сетей являются большие потребности памяти вычислительного устройства. Для каждой особи, требуется много памяти, т.к. количество весов и пороговых уровней обычно велико. Количество требуемой памяти пропорционально также размеру популяции. Поэтому при обучении нейронных сетей с помощью генетического алгоритма размер популяции весьма ограничен, что снижает его эффективность.

В процессе поиска оптимальной структуры нейронной сети с помощью генетического алгоритма лучшие результаты получила сеть с семью нейронами в первом скрытом слое ( $n_1 = 7$ ) и двумя нейронами во втором ( $n_2 = 2$ ).

В процессе обучения были получены следующие результаты: средняя ошибка  $E(p)_{cp.} = 4,5\%$ ; максимальная ошибка  $E(p)_{max} = 11\%$ ; средне-квадратичная ошибка  $E(p)_{cp.kv.} = 6,3\%$ .

Результаты тестового моделирования процесса резания на обученной нейронной сети представлены на рисунке 5.7 в виде графика зависимости параметра шероховатости  $R_a$  от скорости  $v$  резания и подачи  $s$ .

Как видно из рисунка данный график с незначительными погрешностями повторяет общую закономерность, полученную экспериментальным путем (см. рисунок 5.5). То есть нейронная сеть достаточно гладко аппроксимирует функцию нескольких переменных  $R_a(v, t, s, \varphi_1, r)$ , заданную ограниченном числом табличных значений.

Применение данной нейронной сети в качестве модели процесса резания позволит заменить сложную многомерную функциональную зависимость более простой сетевой структурой и позволит значительно ускорить процедуру выявления формы и интенсивности связей величины  $R_a$  шероховатости обработанной поверхности с конкретными технологическими факторами.

Следует отметить, что подобные модели являются приближенной имитацией технологического процесса и служат основой для беспоисковых систем адаптивного управления. Использование нейросетевого имитационного моделирования технологических процессов позволяет сформировать своего рода «виртуальный» датчик для диагностики и динамического мониторинга выходных параметров обработки. Однако точность такого датчика зависит от того, насколько адекватна применяемая модель процесса текущим условиям обработки, то есть некоторым недостатком имитационных моделей является отсутствие адекватного отклика на изменяющиеся условия протекания процесса (возмущения), например на износ режущего инструмента.

Таким образом, предложенная выше нейросетевая модель наиболее применима для процессов обработки широко распространенных конструк-

ционных сталеЙ при режимах резания, не характеризующихся интенсивным износом инструмента.

### 5.3.3. Нейронно-сетевая модель управления шероховатостью поверхности при резании

Задача построения диагностической модели процесса стружкообразования и образования микронеровностей на обработанной поверхности сводится к определению вида зависимости

$$R_a(\mu_{ln\ стр.}, \sigma_{ln\ стр.}, \alpha_{ln\ стр.}, H_1, D_0, \Delta).$$

Решим эту задачу с помощью нейросетевого аппроксимирования.

Поиск оптимальной структуры нейронной сети проводился с помощью программного обеспечения Matlab версии 6,5 и привел к архитектуре, содержащей 6 нейронов в первом скрытом слое и 1 нейрон во втором скрытом слое (см. рисунок 5.8). Во входном слое присутствуют 6 нейронов с линейной активационной функцией, которые производят предобработку и нормировку входных аргументов модели  $\mu_{ln\ стр.}$ ,  $\sigma_{ln\ стр.}$ ,  $\alpha_{ln\ стр.}$ ,  $H_1$ ,  $D_0$  и  $\Delta$ . Выходной слой служит для обратного масштабирования выходного значения нейрона второго скрытого слоя к значению параметра шероховатости  $R_a$ .

Аппаратно предлагаемая диагностическая нейросетевая модель может быть выполнена на основе небольшого количества микроэлектронных компонентов, большинство из которых широко используются в автоматизированных системах управления технологическими процессами (см. рисунок 5.9).

Для динамической регистрации сигнала виброакустической эмиссии в состав аппаратной модели входит аналого-цифровой преобразователь.

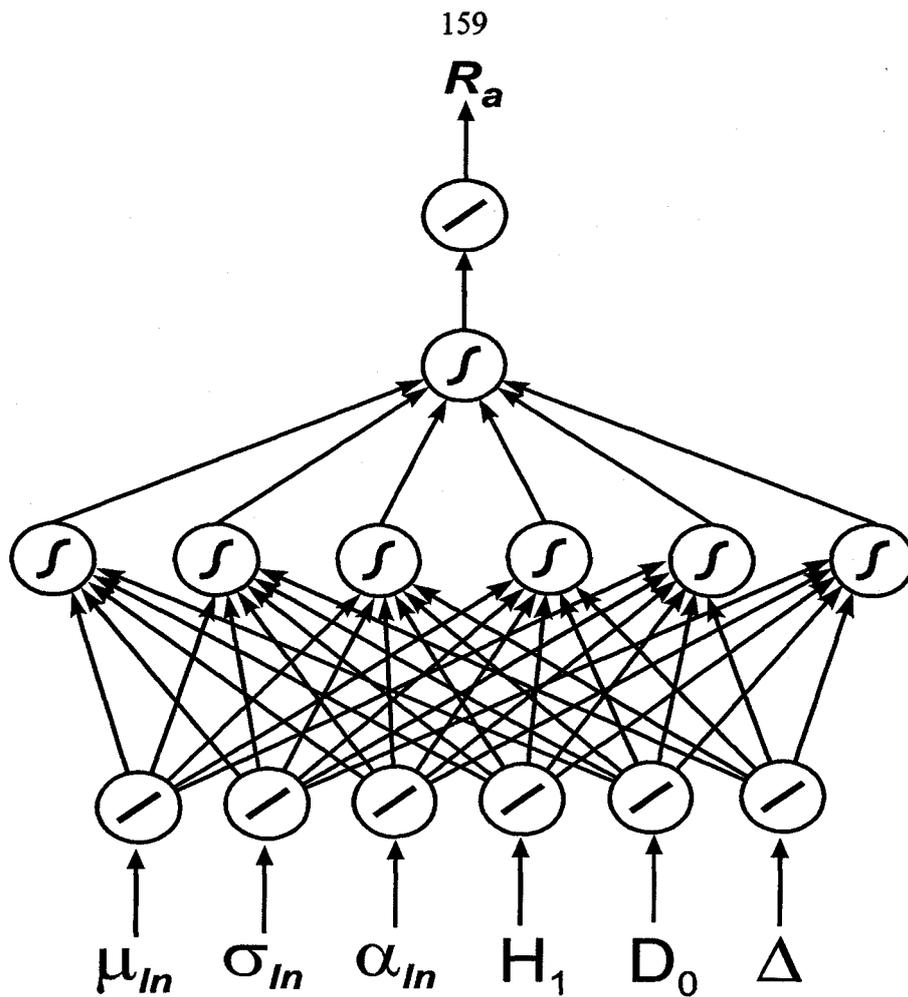


Рисунок 5.8. Структура нейронной сети динамической диагностики параметра шероховатости  $R_a$  с помощью сигнала виброакустической эмиссии

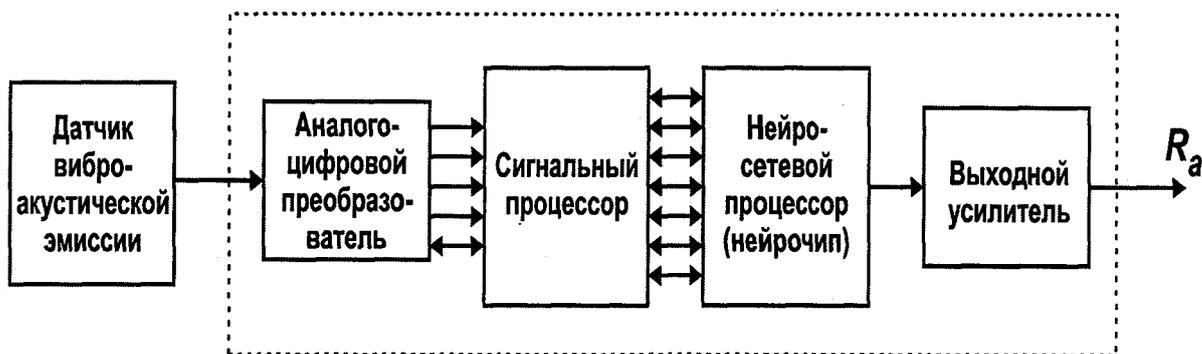


Рисунок 5.9. Возможная схема аппаратной реализации нейронной сети динамической диагностики параметра шероховатости  $R_a$  с помощью сигнала виброакустической эмиссии

Вычисление спектра мощности ВЭ, расчет статистических моментов  $\mu_{\ln \text{ стр.}}$ ,  $\sigma_{\ln \text{ стр.}}$ ,  $\alpha_{\ln \text{ стр.}}$  и фрактальных характеристик  $H_1$ ,  $D_0$ ,  $\Delta$  выполняет сигнальный процессор, а вычислительную нагрузку по аппроксимации функции параметра шероховатости  $R_a$  берет на себя специализированный нейросетевой процессор, содержащий в своих регистрах памяти имитационную модель процесса резания, сформированную на этапе обучения.

Применение аппарата нейронных сетей для решения задач моделирования технологических процессов обусловлено огромными потенциальными возможностями, этих технологий. Существуют задачи, решение которых просто невозможно аналитическими методами, а нейросети успешно с ними справляются. Даже в том случае, если можно найти решение при помощи уже изученных алгоритмов, нейронные сети порой позволяют сделать то же самое быстрее и более эффективно.

#### 5.4. Выводы

1. Разработана диагностическая модель процесса стружкообразования и образования микронеровностей на основе зависимости  $R_a = f(f_{\text{стр.}})$ .
2. Проведен диагностический анализ зависимости  $R_a$  шероховатости поверхности от  $H_1$  информационной энтропии.
3. Разработана имитационная модель процесса резания на основе обучаемой искусственной нейронной сети.
4. Разработан генетический алгоритм синтеза архитектуры нейронной сети.
5. Разработана нейронно-сетевая модель управления шероховатостью поверхностного слоя.

## 6. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ режимов резания по степени их влияния на шероховатость обработанной поверхности.

2. Установлены зависимости шероховатости обработанной поверхности от режимов резания (скорости –  $V$ , подачи –  $S$ , глубины резания –  $t$ ).

3. Установлено, что на подошве наростов фиксируются вихревые (поворотные) моды деформации. Предложена модель образования нароста при резании, как результат конкуренции и перемешивания мелкомасштабных и крупномасштабных вихрей.

4. Выявлены закономерности формирования шероховатости обработанных поверхностей при резании на основе вихревого механизма деформации обрабатываемого материала в окрестности режущего лезвия.

5. Установлена корреляционная связь шероховатости обработанной поверхности с частотой образования элементов стружки. В этой связи частоту стружкообразования  $f_{стр}$  можно рассматривать диагностирующим признаком, позволяющим прогнозировать шероховатость поверхностного слоя при резании.

6. Предложены новые информационные критерии оценки шероховатости обработанной поверхности: фрактальная размерность –  $D$ , информационная энтропия –  $H_1$ , погрешность самоподобия –  $\Delta$ .

7. Разработаны алгоритмы оценки обобщенных фрактальных размерностей – хаусдорфовой ( $D_0$ ), информационной ( $D_1$ ), корреляционной ( $D_2$ ), а также информационной энтропии ( $H_1$ ) и погрешности самоподобия ( $\Delta$ ).

8. Установлены зависимости фрактальной размерности шероховатости обработанной поверхности, информационной энтропии, погрешности самоподобия от условий обработки. Выявлена тесная корреляция между зависимостью шероховатости поверхности от скорости резания и инфор-

мационных характеристик от скорости резания. Поэтому параметры  $D_0$ ,  $H_1$ ,  $\Delta$  могут служить диагностирующими признаками при оценке шероховатости поверхности в процессе резания. Установленная связь шероховатости поверхности с информационными характеристиками позволяет определить оптимальную скорость резания  $V_{\text{опт}}$ , при которой высота неровностей  $R_z$  является минимальной.

9. Разработан стенд, программное и аппаратное обеспечение для диагностирования параметра шероховатости  $R_a$  в процессе резания.

10. Разработана диагностическая модель процесса формообразования на основе зависимости  $R_a = f(f_{\text{стр}})$ .

11. Разработана имитационная модель процесса резания на основе обучаемой искусственной нейронной сети.

12. Информационные критерии, отражающие связи между шероховатостью поверхности и элементами процесса резания, представлены в форме нейросетей, преимущество которых связано с гибкостью моделирования и возможностью применения процедуры обучения.

## 7. БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированная система назначения технологических условий точения / Безъязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Киселев Э.В. // Инструментообеспеч. и соврем. технол. в техн. и мед. / Дон. гос. техн. ун-т.- Ростов н/Д, 1997.- С. 24-26.- Рус.
2. Адаптивное управление станками. Под ред. д-ра техн. наук, проф. Б.С. Балакшина. - М.: Машиностроение, 1973.- 688с.
3. Адаптивное управление технологическими процессами / Ю.М. Соломенцев, В.Г.Митрофанов, С.П. Протопопов и др.- М.: Машиностроение, 1980. – 536с.
4. Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы / С.В.Божокин, Д.А.Паршин.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 128с.
5. Болдырев С.А. Разработка математического и программного обеспечения системы мониторинга микрорельефа при точении. /Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук.- Ростов-на-Дону: Издат. Центр ДГТУ, 2000, 23 с.
6. Бородич Ф.М. Фрактальная шероховатость в задачах контакта и трения (простейшие модели) / Ф.М.Бородич, Д.А.Онищенко // Трение и износ.- 1993.- Т.14, № 3.- С. 452 – 459.
7. Бржозовский Б.М. Динамический мониторинг и оптимизация процессов механической обработки / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов // СТИН.- 2002.- № 1.- С. 3 – 8..
8. Ведмедовский В.А. Чешуйчатость поверхности обработанной протягиванием // Вестник машиностроения. – 1969.- № 10.- С. 48 – 51.

9. Галушкин А.И. Итоги развития теории многослойных нейронных сетей (1965-1995) в работах Научного центра нейрокомпьютеров и ее перспективы.- Нейрокомпьютер, 1996, № 1 и 2.

10. Деформационное упрочнение и развитие дислокационной структуры в поликристаллических ОЦК-металлах / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев, Э.П. Печковский и др. // Металлофизика.-1986.- Т. 8. № 2.- С. 89-96.

11. Дунин-Барковский И.В. Измерения и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова.- М.: Машиностроение, 1978.- 232с., ил.

12. Дунин-Барковский И.В. Пьезопрофилометры и измерения шероховатости поверхности.- М.: Машгиз, 1961.- 312с., ил.

13. Дьяченко П.Е. Исследование зависимости микрогеометрии поверхности от условий механической обработки. М. – Л.: Изд – во АН СССР, 1949.

14. Жарков И.Г. Вибрация при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. – 184с.

15. Жигарев Г.А. Управление шероховатостью обрабатываемой поверхности с помощью анализа сигналов акустической эмиссии.

16. Заковоротный В.Л. Диагностический мониторинг состояния процесса резания / В.Л. Заковоротный, Е.В. Бордачев, М.И. Алексейчик // СТИН. – 1998. - № 12. – С. 6 – 13.

17. Заковоротный В.Л. Прогнозирование и диагностика качества обрабатываемой детали на токарных станках с ЧПУ / В.Л. Заковоротный, Е.В. Бордачев // Известия вузов. Машиностроение. - № 19.

18. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания. – М.: Машгиз, 1956. – 365с.

19. Иванова В.С. Синергетика, прочность и разрушение металлических материалов.- М.: Наука, 1992. – 159с.

20. Иванова В.С. От дислокаций до фракталов. / Сб. ФИПС. М.: Сборник тезисов докладов. 1999. – С. 15 - 17.

21. Иванова В.С. Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев.- М.: Наука, 1994.- 383с.: ил.

22. Исаев А.И. Процесс образования поверхностного слоя при обработке металлов резанием.- М.: Машгиз, 1950. – 252с.

23. Кабалдин Ю.Г. Исследование температуры и адгезии при прерывистом и непрерывном резании // Станки и инструмент. - 1980.- № 4. -С. 27 – 29.

24. Кабалдин Ю.Г. Исследование адгезии и наростообразования при обработке углеродистых сталей / Ю.Г. Кабалдин, Ю.В. Дунаевский, М.В. Семибратова // Изв. Вузов. Машиностроение, 1988. - № 10.- С. 141 - 145.

25. Кабалдин Ю.Г. Механизмы деформации срезаемого слоя и стружкообразование при резании // Вестник машиностроения. - 1993.- № 7.- С. 25 - 30.

26. Кабалдин Ю.Г. Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента // Вестник машиностроения. – 1990.- № 12.- с. 62-68.

27. Кабалдин Ю.Г. Повышение устойчивости процесса резания // Вестник машиностроения.- 1991.- № 6.- с.37-40.

28. Кабалдин Ю.Г. Термодинамический подход к анализу причин возникновения вибраций при резании // Вестник машиностроения.- 1994.- № 4.- С. 19-24.

29. Кабалдин Ю.Г. Трение и износ при резании // Вестник машиностроения.- 1995.- № 1.- С. 26-31.

30. Кабалдин Ю.Г. Резание металлов в условиях адиабатического сдвига элемента стружки // Вестник машиностроения.- 1995.- № 7.- С. 19-25.

31. Кабалдин Ю.Г. Закономерности наростообразования при резании // Вестник машиностроения.- 1995.- № 5.- с.17-23.

32. Кабалдин Ю.Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов. - Владивосток: Дальнаука, 1996.- 183 с., ил. 103.

33. Кабалдин Ю.Г. Управление качеством поверхностного слоя при резании в автоматизированном производстве / Ю.Г. Кабалдин, Ю.В. Дунаевский, О.И. Медведева, А.Г. Серебренникова // Вестник машиностроения.-1993.- № 3.

34. Кабалдин Ю.Г. Повышение качества обработанной поверхности при точении углеродистых сталей / Ю.Г. Кабалдин, О.И. Медведева // Вестник машиностроения.- 1989.- №5.- с. 37 – 41.

35. Кабалдин Ю.Г. Управление стружкообразованием при резании углеродистых сталей // Вестник машиностроения.- 1992.- № 2. – С. 44 – 48.

36. Кабалдин Ю.Г. Оценка устойчивости металлорежущих систем в процессе резания по фрактальной шероховатости обработанной поверхности / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Садовская, А.Г. Серебренникова, О.И. Медведева // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001.- С. 98 – 104.

37. Кабалдин Ю.Г. Повышение надежности процессов механообработки в автоматизированном производстве / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев. - Владивосток: Дальнаука, 1996.- 264с.

38. Кабалдин Ю.Г. Синергетический подход к управлению процессами механообработки в автоматизированном производстве / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев // Вестник машиностроения.- 1996.- № 8.- С. 13 – 19.

39. Кабалдин Ю.Г. Самоорганизующиеся процессы в технологических системах обработки резанием. Диагностика. Управление / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев.- Владивосток: Дальнаука, 1998. – 296с.

40. Кабалдин Ю.Г. Фрактальный подход к оценке хаотической динамики в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый, М.А. Сердцев // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001.- С. 161 – 164.

41. Кабалдин Ю.Г. Фрактальный подход к анализу хаотических динамических процессов в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001.- С. 42 – 45.

42. Кабалдин Ю.Г. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Олейников, А.М. Шпилев, А.А. Бурков. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195с.

43. Кабалдин Ю.Г. Применение нейросетевых моделей процесса резания в системах адаптивного управления / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Биленко, А.М. Шпилев // Конструкторско-технологическая информатика 2000: Материалы IV международного конгресса (г. Москва, 3 – 6 октября 2000г.). – 2000. – т.1. – с. 241 – 243.

44. Кабалдин Ю.Г. Концепция синтеза систем управления технологическими системами на основе принципа самоорганизации и методов искусственного интеллекта / Ю.Г. Кабалдин, А.М. Шпилев, С.В. Биленко // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001.- С. 146 – 153.

45. Карпов А.Н. Обеспечение качества процесса чистовой токарной обработки на основе стабилизации преобразующих свойств динамической системы станка. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Саратов: СГТУ, 1998.- 16 с.

46. Качество поверхности металлов после микрообработки. Assessment of ultra-precision machined surfaces. Hung N. P., Wahid M. F. B., Tua K. F. (School of Mechanical and Production Engineering Nanyang Technological University, Singapore). Mater. and Manuf. Processes. 2000. 15, № 4, с. 521-531, 6 ил. Библ. 8. Англ.

47. Комплексное управление процессом механообработки / Безьязычный В.Ф., Кожина Т.Д., Киселев Э.В. // Развитие произв. технол. в вузах России.- М.: Липецк, 1997.- С. 31-33.- Рус.

48. Клушин М.И. Резание металлов. – М.: Машгиз, 1958. – 454с.

49. Клушин М.И. Состояние разработки вопросов теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием. Горький: ГПИ, 1975. - 79с.

50. Коршунов В.Я. Повышение эксплуатационных свойств машин прогнозированием и технологическим обеспечением физико-механических параметров материалов на основе принципов синергетики // Вестник машиностроения.- 2000.- № 6.- С. 48 – 53.

51. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. – 357с.

52. Кудинов А.В. Фрактальный подход к формированию поверхностей на металлорежущих станках // СТИН. -1996.- № 6.- С. 13 – 16.

53. Кудинов А.В. Особенности нейросетевого моделирования станков // СТИН.- 2001.- № 1.- С. 13 – 18.

54. Кузнецов П.В. Фрактальная размерность как характеристика стадий деформации на мезоуровне при циклическом и активном нагружении / П.В. Кузнецов, В.Е. Панин, Ю. Шрайбер // Сб. ФИПС-99. Фракталы и прикладная синергетика. Москва.: 1999. – С. 142 – 143.

55. Куфарев Г.Л. Теория завивания стружки // Перспективы развития резания конструкционных материалов. – М.: ЦИНГО Машпром, 1980. – С.116 – 121.

56. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента.- М.: Машиностроение, 1982. - 320с.

57. Макаров А.Д. Износ и стойкость режущих инструментов. - М.: Машиностроение, 1966.- 264с.

58. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. - М.: Машиностроение, 1976.-277с.

59. Макаров Р.В. Механика процесса резания металлов в жидких средах и сопутствующие явления / Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. – Иркутск.: ИГТУ, 2000.- 28с.

60. Маленецкий Г.Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г.Г. Маленецкий, А.Б. Потапов. – М.: УРСС, 2000.- 336с.

61. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы.- Нью-Йорк, 1982.- 254с.

62. Марков Н.Н. Нормирование точности в машиностроении / Н.Н. Марков, В.В. Осипов, М.Б. Шабалина: Учеб. для машиностроит. спец. вузов./ Под ред. Ю.М. Соломенцева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 335с.: ил.

63. Марочник стали и сплавов / Д.И. Бережковский, Л.Г. Голеньшин, А.В. Голуб и др. - М.: ЦНИИТМАШ, 1977.- 483с.

64. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологического процесса. – М.: Машиностроение, 1970. – 253с.

65. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин.- Киев: Техніка, 1971. – 122с.

66. Матюшко В.И. Управление шероховатостью при точении с вибрационным дроблением стружки // Вестник машиностроения.- 1987.- № 3.- с.47-48.

67. Метод измерения шероховатости поверхности. Prazise Strukturmeßtechnik mit lasergestutzter Mikroellipsometrie / Holzapfel W., Neuschaefer-Rube U., Doberitsch J., Wirth F. // Techn. Mess.- 1999.- 66, № 11.- С. 455-462.- Нем.; рез. англ.

68. Метод оценки шероховатости обработанной поверхности / Li Chenggui, Zhang Guoxiong, Juan Changliang // Jixie gongcheng xuebao=Chin. J. Mech. Eng.- 1999.- 35, № 1.- С. 15-19.- Кит., рез. англ.

69. Механизмы и сценарии хаотизации технологических систем обработки резанием. Кабалдин Ю.Г., Шпилев А.М., Олейников А.И., Бурков А.А. Вестн. Комс.-на-Амуре гос. техн. ун-та. 2000, № 2, ч. 1, с. 3-23, 12 ил. Библ. 22. Рус.

70. Методика планирования эксперимента при исследовании процессов обработки деталей с целью оптимизации шероховатости обрабатываемых поверхностей / Микитянский В.В., Микитянская Л.М. // Вестн. Астрах. гос. техн. ун-та.- 1998.- механика.- С.3-9.- Рус.

71. Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток : Дальнаука, 2001. – 205 с.

72. Панин В.Е. Структурные уровни деформации твердых тел / В.Е. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев. - Новосибирск: Наука, 1985.-229с.

73. Подураев В.Н. Технологическая диагностика резания методом акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 1988. – 125с.

74. Прогнозирование шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании. Modeling surface texture in the peripheral milling process using neural network, spline and fractal methods with evidence of chaos / Stark G. A., Moon K. S. // Trans. ASME. J. Manuf. Sci. and Eng.- 1999.- 121, № 2.- С. 251-256.- Англ.

75. Развитие науки о резании металлов / Ред. кол. Н.Н. Зорев, Г.И. Грановский, М.Н. Ларик и др. - М.: Машиностроение, 1967.- 416с.

76. Разработка математического и программного обеспечения системы мониторинга микрорельефа при точении. Автореф. дис. канд. техн. наук. Болдырев С.А. Дон. гос. техн. ун-т, Ростов на Дону, 2000, 22 с. Рус.

77. Розенберг А.М. Механика пластического деформирования в процессах резания и демпфирующего протягивания / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг.- Киев: Наукова думка, 1990. – 320с.

78. Розенберг Ю.А. Методы аналитического определения степени деформации металла стружки при резании // Вестник машиностроения.- 2001.- № 3.- С. 34 – 37.

79. Рыбин В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. - М.: Металлургия, 1986.- 224с.

80. Свириденко А.И. Механика дискретного фрикционного контакта / А.И. Свириденко, С.А. Чижик, М.И. Петроковец. - Минск, 1990.- 216с.

81. Серов М.Е. Определение закономерностей формирования шероховатости поверхностей при лезвийной обработке и оценка возможностей смазочно-охлаждающих технологических сред по ее снижению. / Авторе-

ферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук.- Горький: ГПИ, 1988, 19с.

82. Серебренникова А.Г. Управление качеством поверхностного слоя на основе синергетического подхода к процессу резания. / Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук.- Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 1997, 20с.

83. Серый С.В. Применение теории фракталов при анализе хаотических множеств // Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в управлении технологическими системами // Сб. статей под ред. докт. техн. наук, проф. Кабалдина Ю.Г. – Владивосток: Дальнаука, 2001.- С. 33 – 41.

84. Система диагностики режущего инструмента / Шулепов А.В. // Проектир. технол. машин.- 1999.- № 14.- С. 32 – 39.- Рус.

85. Спектральный анализ шероховатости обработанной поверхности при прецизионной обработке. A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining. Cheung Chi Fai, Lee Wing Bun (Department of Manufacturing Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, People 's Republic of China). *Precis. Eng.* 2000. 24, № 1, с. 77-87, 13 ил. Библ. 28. Англ.

86. Способы измерения шероховатости обработанной поверхности. Hochauflosende Topometrie in Kontext globaler Makrostrukturen / Duparre A., Notni G., Recknagel R.-J., Feigt T., Glied S. // *Techn. Mess.*- 1999.- 66, № 11.- С. 437-446.- Нем.; рез. англ.

87. Способ измерения шероховатости обработанной поверхности / Li Chenggui, Dong Shen, Lu Zesheng // *Zhongguo jixie gongcheng=China Mech. Eng.*-1999.-10, № 8.- С. 911-913, 945.- Кит.; рез. англ.

88. Способ оценки шероховатости обработанной поверхности / Ozawa Ryo, Suzuki Yataka, Mori Naoko, Yaguchi Tomio, Itoh Junji, Yama-

moto Shigehiko // *Nyomen kagaku=J. Surface Sci. Soc. Jap.*- 1999.- 20, № 10.- С. 727-731.- Яп.; рез. англ.

89. Способ измерения шероховатости поверхности при концевом фрезеровании. In-process surface roughness recognition (ISRR) system in end-milling operations / Lou S.-J., Chen J. C. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*- 1999.- 15, № 3.- С. 200-209.- Англ.

90. Способ прогнозирования шероховатости обработанной поверхности. Using acoustic emission to predict surface quality / Beggan C., Woulfe M., Joung P., Byrne G. // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*- 1999.- 15, № 10.- С. 737-742.- Англ.

91. Способ определения шероховатости поверхности детали при обработке на металлорежущем станке: Пат. 2163182 Россия, МПК<sup>7</sup> В 23 В 25/06, G 01 В 7/34. ЗАО «КОМПОМАШ -ТЭК», Дорофеев С.Н., Горшков А.С., Летуновский В.В., Моисеев В.А., Гордеев Ю.И. № 2000103090 / 02; Заявл. 11. 02. 2000; Опубл. 20. 02. 2001. Рус.

92. Старков В.К. Дислокационные представления о резании металлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 126с.

93. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. - 296с.

94. Старков В.К. Технологические методы повышения надежности обработки на станках с ЧПУ.- М: Машиностроение, 1984.- 120с.

95. Сулима А.М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов / А.М. Сулима, М.И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. - 256с.

96. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей.- М.: Машиностроение, 1987.- 208с.: ил.

97. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхностей деталей машин при обработке лезвийным инструментом // Вестник машиностроения.- 1988.- С.40-42.

98. Технология обработки конструкционных материалов: Учеб. для машиностр. спец. вузов / П.Г. Петруха, А.И. Марков, П.Д. Беспехотный и др.; Под ред. П.Г. Петрухи. - М.: Высш. шк., 1991.- 512с.: ил.

99. Трефилов В.И. Связь фрактальной размерности поверхности разрушения с механическими свойствами / В.И. Трефилов, В.В. Картузов, Н.В. Минаков // Сб. ФИПС-99. Фракталы и прикладная синергетика.- Москва. : 1999. – С. 10 – 11.

100. Условия получения необходимой шероховатости поверхности при резании металлов. Макаров Р.В., Макарова Е.Р. (Иркутский государственный технический университет). Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии 21-го века», Пенза, 30-31 мая, 2001: Сборник материалов. Ч. 3. Пенза: Изд-во Приволж. дома знаний. 2001, с. 11-12, 3 ил. Рус.

101. Фавстов Ю.К. Металловедение высокодемпфирующих сплавов / Ю.К. Фавстов, Ю.Н. Шульга, А.Г. Рахштадт. - М.: Металлургия, 1986. – 224с.

102. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 260с.

103. Хакен Г. Синергетика. Пер. с англ.- М.: Мир, 1973.- 404с.

104. Холмогорцев Ю.П. Влияние условий резания при разворачивании отверстий на шероховатость поверхности вязких сталей // Вестник машиностроения.- 2001.- № 3.- С. 38 – 40.

105. Шероховатость поверхности при точении. *Materiaux de coupe: Ceux pour le tournage* // *TraMetal*.- 1998.- № 28.- С. 7-8, 11-13.- Фр.

106. Шероховатость поверхности при скоростном точении алюминиевого сплава. *A study on ultra-high-speed cutting of aluminium alloy:*

Formation of welded metal on the secondary cutting edge of the tool and its effects on the quality of finished surface. Yousefi Reza, Ichida Yoshio. *Precis. Eng.* 2000. 24, № 4, с. 371-376, 9 ил. Библ. 10. Англ.

107. Шероховатость поверхности деталей из керамик  $Al_2O_3$  и  $Si_3N_4$  после алмазного точения. *Microroughness of technical ceramics  $Al_2O_3$  and  $Si_3N_4$  in a hard state after turning with application of diamond edges.* Jankowiak M., Kowalec M. 6 *Medzinarodna konferencia: Technologia ' 99, Bratislava, 8-9 sept., 1999: Zb. prednas. D. 2. Bratislava. 1999, с. 499-502, 4 ил. Библ. 6.* Англ.

108. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы. Миниатюры из бесконечного рая.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 528с.

109. Якобсон М.О. Шероховатость, наклеп и остаточные напряжения при механической обработке. – М.: Машигиз, 1986. – 292с.