

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. И. РАЗЗАКОВА**

Кафедра «Технология машиностроения»

На правах рукописи

УДК 621. 951.45

Дыйканбаева Урпия Маматкадыровна



**Разработка метода повышения качества поверхностного слоя
отверстий при сверлении**

05.02.08 – технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, профессор
Рагрин Николай Алексеевич

Бишкек – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.1. Показатели качества поверхностного слоя деталей машин.....	10
1.1.1. Дефекты поверхностного слоя и их влияние на прочность металлов.....	11
1.1.2 Виды и причины остаточных напряжений.....	13
1.2. Физическая сущность упрочнения металла наклепом.....	18
1.3. Технологические методы упрочнения наклепом.....	20
1.4. Другие методы упрочнения обработанной поверхности детали	27
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	32
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	33
2.1. Методы получения отверстий.....	33
2.2. Методы контроля качества поверхностного слоя просверленных отверстий.....	37
2.2.1. Контроль глубины дефектного поверхностного слоя.....	42
2.2.2. Контроль упрочнения поверхностного слоя отверстий.....	50
2.3. Методы статистического анализа экспериментальных данных.....	55
2.3.1. Методика определения закона распределения случайной величины.....	56
2.3.2. Методы корреляционного анализа экспериментальных данных	59
2.3.3. Методы регрессионного анализа статистических зависимостей	61
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	65

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТВЕРСТИЙ.....	66
3.1. Характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя.....	67
3.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от параметров режима резания.....	78
3.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи.....	79
3.2.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания.....	82
3.3. Построение эмпирической модели зависимости глубины дефектного поверхностного слоя отверстий от параметров режима резания.....	86
3.3.1. Методика разработки обобщенной эмпирической модели.....	87
3.4. Упрочнение поверхностного слоя отверстий.....	89
3.4.1. Анализ корреляционной связи скорости резания, подачи и твердости отверстий	90
3.4.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от параметров режима резания.....	99
3.4.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от подачи	99
3.4.2.2. Определение коэффициентов регрессии твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания	102
3.4.3. Построение эмпирической модели зависимости твердости от параметров режима резания.....	106
3.5. Физические закономерности повышения качества поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами.....	108

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	119
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	130
Приложение 1.....	131
Приложение 2.....	136
Приложение 3.....	137
Приложение 4.....	138

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации.

Большое количество деталей технологической оснастки имеют отверстия высокой точности и относительно малого диаметра, к которым предъявляются высокие требования к износостойкости. К ним относятся отверстия подвижных соединений технологической оснастки, на износостойкость которых в большой степени влияет глубина дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий. От этого зависит долговечность технологической оснастки и качество изделий машиностроения. Технологический процесс получения точных отверстий относительно малого диаметра содержит семь переходов обработки осевыми инструментами, первым из которых всегда является сверление. Следующие за сверлением переходы повышают качество отверстий снижением технологического допуска на размер, шероховатости поверхности и глубины дефектного поверхностного слоя. При этом ни один из этих технологических переходов не упрочняет поверхность обработанных отверстий. Поэтому проблема снижения глубины дефектного поверхностного слоя при одновременном упрочнении поверхности отверстий, обработанных сверлением, является актуальной, решение которой позволит повысить долговечность технологической оснастки и качество изделий машиностроения и значительно снизить трудоемкость их изготовления.

Связь темы диссертации с крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами.

Диссертация связана с научно-исследовательской работой «Организационно-технологическое проектирование производственных систем» кафедры «Технология машиностроения» КГТУ им. И. Раззакова

Цель и задачи исследования.

Целью диссертационной работы является снижение глубины дефектного поверхностного слоя при одновременном повышении твердости поверхности отверстий, обработанных стандартными спиральными сверлами с целью

повышения качества и долговечности деталей машин и снижения трудоемкости их изготовления.

Задачи исследований:

1. Исследование и получение зависимостей, отражающих влияние скорости резания и подачи на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, просверленных стандартными спиральными сверлами.

2. Разработка методологии планирования, организации и проведения экспериментов, объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

3. Разработка эмпирической модели влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий на основании результатов экспериментов.

Научная новизна полученных результатов:

1. Экспериментально исследовано и получены соответствующие результаты влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий: установлено, что на скоростях резания меньших 6 м/мин, глубина дефектного поверхностного слоя уменьшается в результате снижения температуры резания и пластичности обрабатываемого материала.

2. Разработаны эмпирические зависимости глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от скорости резания и подачи с использованием методов корреляции и регрессионного анализа.

3. Разработана новая конструкция сверла, обеспечивающая повышение стойкости сверл и качества поверхности обработанных отверстий, новизна которой подтверждена Патентом Кыргызской Республики № 264.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработана методология планирования, организации и проведения экспериментов, объектом которых является глубина дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

2. Результаты исследований легли в основу методических указаний «Методы контроля качества обработанной поверхности и поверхностного слоя», учебного пособия «Повышение качества отверстий обработанных сверлением» и учебника «Повышение стойкости спиральных сверл и качества обработки сверлением», используемых в учебном процессе подготовки бакалавров и магистров по направлению Машиностроение в КГТУ им. И. Раззакова.

3. Внедрено в производство представленные методы повышения качества поверхностного слоя отверстий, в части снижения глубины дефектного поверхностного слоя до 25 мкм и повышения твердости поверхности отверстий. Это позволяет уменьшить трудоемкость обработки высокоточных отверстий диаметром 10...18 мм за счет исключения следующих переходов: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное и чистовое развёртывание.

Экономическая значимость полученных результатов. Разработанные практические рекомендации по расчету режимов резания, позволяют существенно снизить трудоемкость практически в два раза за счет уменьшения количества технологических переходов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

2. Эмпирические зависимости глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от скорости резания и подачи. Эмпирические модели, отражающие влияние параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности

просверленных отверстий, полученные применением методов аппроксимации, корреляционного и регрессионного анализа результатов исследования, позволяющие исключить несколько технологических переходов обработки отверстий высокой точности, повысить качество технологической оснастки и снизить трудоемкость ее изготовления.

3. Метод повышения качества поверхностного слоя отверстий при сверлении, позволяющий использовать стандартные быстрорежущие спиральные сверла для получения отверстий, имеющих глубину дефектного поверхностного слоя в пределах 25 мкм при одновременном повышении твердости поверхности отверстий до 2-х раз.

4. Методология планирования, организации, проведения экспериментов, отличающаяся от известных методологий тем, что объектом исследования являются показатели качества поверхностного слоя отверстий, обработанных стандартными быстрорежущими спиральными сверлами, позволяющая повысить качество результатов исследований и снизить их трудоемкость.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты исследований получены соискателем лично под руководством научного руководителя. Разработаны: условия и характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и упрочнение поверхности просверленных отверстий, эмпирические модели, отражающие характер этого влияния, методология планирования, организации, проведения исследований.

Апробации результатов исследования. Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих международных конференциях:

1. Четырнадцатая общероссийская научно-практической конференции: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. - Санкт-Петербург, БГТУ, 2022 г.

2. Международная научно-практическая конференция «Инновации в науке и технике» Посвященная памяти первого декана ЕТФ профессора Юрикова В.А. Бишкек, КРСУ им. Б.Н. Ельцина, 2022 г.

3. Международная научно – практическая конференция «Наука, образование, инновации и технологии: оценки, проблемы, пути решения», посвященная 80 – летию ученого – педагога Ж. Усубалиева и 30 – летию Инженерной Академии КР. Кыргызский государственный университет геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. академика У. Асаналиева; Инженерная академия Кыргызской Республики; Инженерный центр. Бишкек, «АСКАТЕШ, 2022 г.

4. VIII Международная сетевая научно-практической конференции «Современные интеграционные процессы в развитии инноваций в образовании и науке» Бишкек, КГТУ им. И. Раззакова, 2022 г.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.

По материалам диссертации опубликовано 19 научных статей, в том числе пять за рубежом, а также патент в КР № 264.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов и практических рекомендаций, списка использованной литературы и приложений. Содержание диссертации изложено на 138 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунков, 60 таблиц, библиографию из 85 наименований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1. Показатели качества поверхностного слоя деталей машин

Важнейшими показателями состояния поверхностного слоя являются глубина залегания остаточных напряжений и степень наклепа [1]. На рисунке 1.1 представлена эпюра изменения остаточных напряжений в зависимости от расстояния Δ от обработанной поверхности при обработке резанием большинства пластичных материалов. В очень тонком слое толщиной $0,001 \div 0,004$ мм (зона 1) действуют сжимающие напряжения. В зоне 2, протяженность которой зависит от режима резания и переднего угла инструмента, действуют растягивающие напряжения. Протяженность зоны 2 в 10 раз и более превосходит протяженность зоны 1, и поэтому состояние поверхностного слоя определяют характер и величина напряжений в зоне 2. В зоне 3, уравнивающей действие остаточных напряжений первых двух зон, напряжения сжимающие.

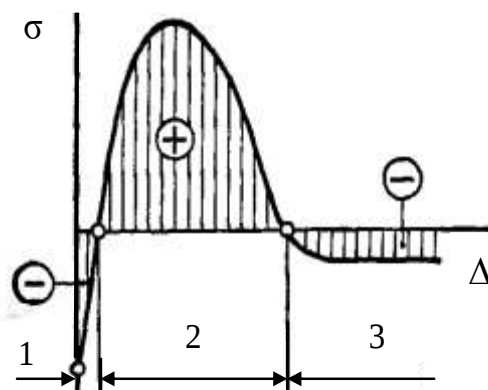


Рисунок 1.1 - Эпюра изменения остаточных напряжений в зависимости от расстояния от обработанной поверхности

Наличие в поверхностном слое растягивающих напряжений значительно ухудшает его качество, так как при этом снижается усталостная прочность, а если остаточные напряжения по величине превосходят предел прочности материала

обрабатываемой детали, то это может привести к появлению поверхностных трещин [2].

Наклепом называется изменение структуры и свойств металла, вызванное его пластической деформацией. При этом металл упрочняется. Под степенью наклепа поверхностного слоя ΔH понимают отношение разности наибольшей микротвердости $H_{нс}$ наклепанного слоя и микротвердости обрабатываемого материала H_m к микротвердости обрабатываемого материала H_m , $\Delta H = (H_{нс} - H_m) / H_m$. Остаточные напряжения, возникающие в поверхностном слое, и его наклеп являются следствием действия сил резания, температуры и структурных превращений. При обработке резанием остаточные напряжения образуются главным образом в результате воздействия сил резания, температура имеет второстепенное значение. При обработке хрупких материалов, например, чугунов, - остаточные напряжения сжимающие, при обработке пластичных материалов, например, углеродистых конструкционных сталей, остаточные напряжения чаще всего растягивающие [3, 4].

1.1.1. Дефекты поверхностного слоя и их влияние на прочность металлов

Межзеренные границы (внутренние поверхности) являются дефектом кристаллического строения. Зернистость структуры легко обнаруживается при обычном металлографическом исследовании металлов. Помимо этого, в пределах зерна имеются другие дефекты: точечные и линейные, выявляемые с помощью рентгеноструктурного анализа, электронографии и других методов. Таким образом, различают три вида дефектов кристаллической структуры: точечные, линейные и поверхностные [5, 6].

Дефекты кристаллической решетки вызывают местные отклонения энергии тепловых колебаний и плотности упаковки атомов, что изменяет прочность металла.

Точечными называются дефекты в изолированных друг от друга точках, размер которых во всех трех направлениях мал и сравним с размером элементарной атомной ячейки. К точечным дефектам относятся: вакансии, т.е. свободные узлы в атомно-кристаллической решетке, в которых нет атома,

промежуточные атомы, смещенные в междоузлия, а также атомы примесей, которые могут или замещать атомы металла в решетке, или быть внедренными в междоузлия [7].

Количество вакансий в атомно-кристаллической решетке реальных металлических сплавов незначительно, а атомов примесей бывает много, т.к. даже тысячные доли процента вносят большое количество посторонних атомов. Могут быть скопления вакансий, промежуточных атомов и атомов примесей, называемые "облаками", являющиеся зародышами субмикроскопических трещин [8].

Обработка резанием сопровождается повышением температуры, в результате происходит тепловое движение атомов, средняя амплитуда их колебаний увеличивается, и количество вакансий возрастает. Благодаря тепловому движению атомов вакансии, смещения атомов и примеси могут изменять свое положение, т.е. перемещаться в атомной решетке. Переход атомов из одних равновесных положений в их решетке в другие называется самодиффузией, а наименьшая избыточная энергия, необходимая для самодиффузии, называется энергией активации. Чем выше температура, тем больше вакансий в решетке и тем легче они перемещаются [9].

Поверхностными называются дефекты, распространяющиеся на значительное расстояние в двух направлениях. Они бывают внутренние и наружные. Внутренние – это, прежде всего границы между зернами и их блоками [10].

Межзеренные прослойки металла имеют разрыхленное строение, атомы расположены неправильно, силы их сцепления значительно меньшие, а энергия атомов увеличена. Диффузия в пограничных слоях зерен в несколько раз больше, чем внутри кристаллической решетки зерна. Поэтому атомы примесей особенно интенсивно накапливаются у границ зерен, образуя межзеренную прослойку. В перенаклепанном металле у границ зерен возможно скопление значительного количества трещин [11]. Границы зерен являются слабым местом структуры, по ним происходит скольжение, а в ряде случаев и отрыв металла.

Поверхностной энергией называется работа, затрачиваемая на образование единицы новой поверхности. Эта энергия в значительной мере характеризует эксплуатационные свойства детали. Атомы кристаллической решетки, находящиеся на поверхности, располагаются иначе, чем внутренние. Внутренние молекулы твердого тела окружены, со всех сторон аналогичными им частицами, ввиду чего силы молекулярного взаимодействия взаимно уравновешены [12].

На молекулы, находящиеся на поверхности, молекулярные связи (силы) действуют лишь со стороны внутри находящихся молекул, ввиду чего поверхностные молекулы более притянуты (прижаты) к соседним внутренним. В итоге получается упругое вжатие поверхностного слоя, вызывающее концентрацию в нем энергии. Чем выше микротвердость детали, тем больше ее поверхностная энергия. Режущее лезвие инструмента режет металл потому, что поверхностная энергия инструмента больше энергии обрабатываемого металла. Если в процессе резания тепловыделение усиливается, то поверхностная энергия детали увеличивается. Поверхности с одинаковой шероховатостью, но обработанные различными технологическими методами, могут иметь различную поверхностную энергию, а значит и различные эксплуатационные свойства [13].

И так, основными нарушениями атомо-кристаллической решетки являются вакансии, дислокации и зернистость строения. Наличие дефектов кристаллической решетки изменяет прочность металла.

1.1.2 Виды и причины остаточных напряжений

Остаточными называются напряжения в деталях машины при отсутствии действия на них внешних нагрузок (в том числе и сил веса). Остаточные напряжения по протяженности силового поля разделяются на четыре рода: нулевого, первого, второго и третьего [14]. Остаточные напряжения нулевого рода возникают в системе взаимосвязанных тел, например, в результате осуществления сборки узла или машины (в результате прессовых посадок в сопряжениях, при затяжке винтовых соединений и др.).

Остаточные напряжения первого рода (макронапряжения)

уравновешиваются в объемах, соизмеримых с размерами детали, они имеют ориентацию, связанную с конфигурацией детали.

Остаточные напряжения второго рода (микронапряжения) уравновешиваются в микрообъемах (в пределах нескольких зерен или внутри одного зерна при наличии мозаичности его структуры и др.). Основными факторами, вызывающими микронапряжения являются: фазовые превращения, увеличивающие или уменьшающие плотность металла; изменения температуры при наличии в металле различных по природе компонентов с различными коэффициентами линейного расширения (например, зерна графита в чугунах, случайные включения); анизотропия свойств отдельных зерен; разница модулей упругости различных структурных составляющих; границы зерен, а также фрагментов и блоков внутри них, отличающиеся по своим свойствам от металла внутри зерна, не имеющего указанных дефектов [15].

Остаточные напряжения третьего рода уравновешиваются в пределах нескольких ячеек кристаллической решетки или межзеренной границы. Одной из основных причин возникновения остаточных напряжений третьего рода - дефекты кристаллической решетки, в частности - дислокации. Скопление дислокаций по границам зерен вызывает в граничных слоях их остаточные напряжения третьего рода.

Остаточные напряжения первого рода (макронапряжения) могут возникать как в материале с неоднородной кристаллической структурой (зернистость, дислокации, вакансии, посторонние включения и др.), так и в материале с однородным кристаллическим строением.

Остаточные напряжения второго рода (микронапряжения) могут возникать лишь в материале с неоднородным кристаллическим строением. В этом заключается их существенное отличие от остаточных напряжений первого рода.

Остаточные напряжения могут быть объемные, уравновешенные в значительной части объема детали, и поверхностные. Поверхностные остаточные напряжения образуются и уравновешиваются в тонком

поверхностном слое детали [12]. При рассмотрении вопросов технологического влияния на повышение надежности машин наибольший интерес представляют поверхностные микронапряжения. Величина поверхностных микронапряжений, определяется главным образом плотностью однородных дислокаций. Сжимающие поверхностные напряжения образуются, когда у поверхности преобладает скопление положительных дислокаций, так как лишние атомные плоскости у дислокаций сокращают межатомные расстояния, что вызывает увеличение отталкивающих межатомных сил. Преобладающее расположение у поверхности отрицательных дислокаций, при которых отсутствуют соответствующие атомные плоскости, способствуют увеличению притягивающих межатомных сил и возникновению поверхностных растягивающих напряжений [16].

Главной причиной возникновения остаточных напряжений в деталях машин является неоднородность объемных и линейных изменений их материала в процессе выполнения технологических операций: отливке, ковке, термической и химико-термической обработке, сварке, обработка резанием, обработке давлением и других [17, 18].

Литейные, ковочные, сварочные напряжения, а также напряжения при горячей прокатке возникают в результате неравномерного нагрева и остывания отдельных элементов детали. Более тонкие стенки детали остывают быстрее, а более толстые, особенно находящиеся внутри корпусной детали, остывают медленнее. При этом в одних элементах (частях) детали возникают остаточные напряжения сжатия, а в других растяжения, в целом они взаимно уравновешены [19].

При термической обработке неравномерность нагрева и остывания обычно бывает меньшей, чем при вышеописанных технологических операциях, однако здесь дополнительными факторами, вызывающими остаточные напряжения, являются фазово-структурные превращения, неравномерность протекания которых приводит к переменному изменению плотности материала в различных

частях детали. Например, поскольку наружные слои стальных деталей закаливаются сильнее внутренних, то и превращение аустенита в мартенсит в них будет более полное, что приводит к поверхностным остаточным напряжениям сжатия, т.к. плотность мартенсита меньше плотности аустенита.

При химико-термической обработке, помимо выше названных факторов, на появление остаточных напряжений оказывает влияние насыщение поверхностных слоев другими элементами. В результате цементации, азотирования, борирования плотность насыщенного слоя уменьшается (объем его увеличивается), что также способствует возникновению остаточных сжимающих поверхностных напряжений [20].

Как уже было отмечено, при упрочняющей обработке методами поверхностно-пластической деформации происходит силовое и тепловое воздействие на поверхностный слой. Силовое воздействие (обжатие) вызывает значительную пластическую деформацию сжатия, способствующую накоплению положительных дислокаций, вокруг которых уменьшаются межатомные расстояния, т.е. металл получается сжатым, а под поверхностным слоем растянутым [21].

Поверхностно-пластическая деформация закаленной стали аустенитно-мартенситного класса способствует также превращению остаточного аустенита в мартенсит, что увеличивает объем поверхностного слоя и вызывает дополнительные сжимающие поверхностные напряжения.

Образующаяся при поверхностно-пластической деформации теплота действует в противоположном направлении, т.е. она может снять образовавшийся наклеп и сжимающие напряжения и существенно увеличить объем нагретого металла поверхностного слоя. При остывании объем его уменьшается, что приводит к появлению поверхностных растягивающих напряжений. При поверхностно-пластической деформации необходимо определить оптимальный режим, при котором превалирующим будет силовое воздействие с образованием остаточных поверхностных сжимающих напряжений [22, 23].

При обработке металлов резанием, как и при поверхностно-пластической деформации, происходят такие же воздействия на поверхностный слой. Однако количественное воздействие силового и теплового факторов чаще бывает противоположно. Тепловое воздействие является превалирующим, что по вышеописанной причине приводит к поверхностным остаточным растягивающим напряжениям. Кроме того, при обработке мягких сталей со сливной стружкой удельный вес деформаций растяжения в зоне резания, возрастает, а деформации сжатия уменьшаются (в сравнении с процессом резания при элементарной стружке), что может в целом вызывать остаточные поверхностные напряжения растяжения [24].

Влияние остаточных напряжений на прочность металлов различно при статических, динамических и циклических нагрузках. Кроме того, оно отличается при вязком и хрупком разрушениях металлов. Начало разрушения характеризуется субмикроскопическими явлениями в металле, а не макроскопическими. Оно зависит не только от механических свойств материала, определяющих его пластическую деформацию, но и от состояния поверхностного слоя, наличия коррозионной среды, масштабного фактора, энергетического уровня поверхности и другие [25].

Если суммарное напряжение не превышает предела текучести, т.е. когда металл деформирован лишь упруго, остаточные напряжения суммируются с напряжениями от действия внешних сил алгебраически и их влияние на прочность детали одинаково. Если суммарные напряжения превышают предел текучести и металл пластически деформируется, то остаточные напряжения уменьшаются или же полностью исчезают и их нельзя суммировать алгебраически с напряжениями от внешних нагрузок. Считается, что 0,2% пластической деформации достаточно для снятия остаточных напряжений [26]. Поэтому для пластичных материалов, не подвергнутых упрочнению, остаточные напряжения менее опасны, чем для хрупких. Если же пластичный материал получил упрочнение в результате пластической деформаций, то его пластические свойства снижаются, хрупкость возрастает и возникшие в таком

состоянии остаточные напряжения по своим разрушающим воздействиям такие же, как и напряжения от внешних сил и т.е. суммируются с ними [27].

1.2. Физическая сущность упрочнения металла наклепом

На рисунке 1.2 условно показано влияние количество дефектов n кристаллической решетки на прочность металлов [28]. Как видно, с увеличением дефектов прочность вначале резко снижается. При увеличении дефектов кристаллической решетки нарушается межатомные связи, уменьшается одновременное участие атомов в сопротивлении деформации. Отрезок aO представляет теоретическую прочность кристалла без дефектов. Отрезок $\sigma_n - O$ равен прочности выращенных нитевидных кристаллов, отмеченных ранее. Участок кривой ab соответствует уменьшению прочности металла вследствие увеличения до наиболее невыгодного количества n_1 дефектов решетки участок bc соответствует увеличению числа дислокаций кристаллической решетки от 10^4 до 10^{12} на 1см^2 (т.е. от n_1 до n_2) при технологическом упрочнении металлов, что приводит к пересечению дислокаций, окружению их скоплениями точечных дефектов (атомы междоузлиях, атомы примесей и др.). Это затрудняет перемещение дислокаций, металл упрочняется, как бы «вырабатывает» способность увеличения сопротивления разрушению.

Технологическое упрочнение наклепом осуществляется путем силового воздействия при прокатке, штамповке, а также термопластической обработке металлов. Точка c соответствует предельному насыщению дефектами кристаллической решетки плотность дислокации $n_2 = 10^{14} - 10^{15}$ на 1см^2 . При дальнейшем увеличении наклепа происходит разрушение материала (перенаклеп). Дальнейшее упрочнение наклепом невозможно.

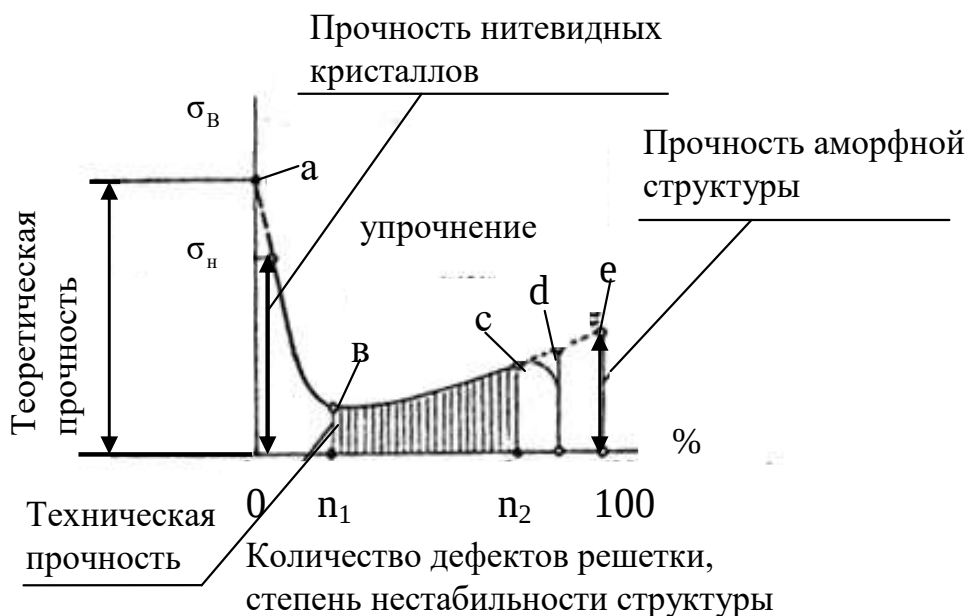


Рисунок 1.2 - Влияние количества дефектов n кристаллической решетки на прочность металлов

Теория дислокаций позволяет понять двойственную природу пластической деформации: вначале деформация приводит к упрочнению металла, т. е. увеличению напряжения течения с ростом количества дефектов, подготавливая условия для его разрушения. Деформационное упрочнение, т.е. наклеп, наступает вследствие взаимодействия полей напряжений дислокаций между собой, а также с другими несовершенствами (дефектами) кристаллической решетки, затрудняющими перемещение самих дислокаций.

С увеличением степени наклепа возрастает твердость металла, предел текучести, предел упругости, предел прочности, понижается пластичность и ударная вязкость. При этом предел текучести растет быстрее предела прочности. Эти оба прочностные параметры у сильно наклепанных металлов сравниваются, а относительное удлинение приближается к нулю [29].

Наклеп может повысить твердость и предел прочности в 1,5-3 раза, и снизить предел текучести в 3-7 раз.

Чем мельче зерно, тем выше прочность металла. Упрочнение металла при холодной пластической деформации сопровождается поглощением энергии. При деформации различных металлов поглощается от 8 до 16% затраченной работы.

С увеличением степени деформации рост поглощенной энергии, в процентах к затраченной, уменьшается, т.е. металл стремится к энергетическому насыщению. Это насыщение, т.е. предел упрочнения, для углеродистых сталей наступает при 40-50 процентной деформации.

При пластической деформации поверхностного слоя закаленных сталей с мартенситно-аустенитной структурой происходит превращение значительной части остаточного аустенита в мартенсит [30], что дополнительно увеличивает остаточные напряжения сжатия.

1.3. Технологические методы упрочнения наклепом

Обработка методом обкатывания. Обработка методом обкатывания чаще всего производится на токарных станках. Обрабатываемая деталь, в зависимости от конструкции, закрепляется в центрах или патроне, а обкатное приспособление (обкатник) - в резцедержателе.

В процессе обкатывания деталь вращается, а деформирующий инструмент (шар), находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью, вместе с обкатным приспособлением имеет продольную подачу (рисунок 1.3). Благодаря самоустанавливаемости шара во время обкатывания обеспечивается свободное вращение шара при трении качения между шаром и деталью. В силу этого создаются более благоприятные условия для пластической деформации, обеспечивающие получение менее шероховатой поверхности при небольшом давлении шара. Процесс обкатывания рекомендуется проводить с применением смазывающей охлаждающей жидкостью, для чего используют индустриальное масло [31]. При смазке снижается коэффициент трения, температура контактных поверхностей становится ниже, что способствует получению более высокого класса шероховатости поверхности.

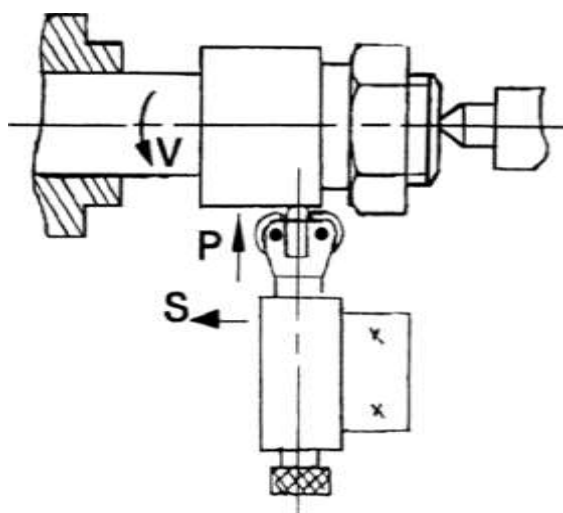


Рисунок 1.3 - Схема обкатывания шариком

При обкатывании шероховатость обработанной поверхности и упрочнение детали зависят от параметров процесса. Основными параметрами процесса обкатывания являются следующие:

1. среднее давление в контакте p ;
2. контактная площадь F_K ;
3. величина нормальной силы, передаваемой со стороны инструмента на обрабатываемую поверхность;
4. размеры деформирующего инструмента R ;
5. продольная подача s ;
6. скорость обработки v .

Обкатывание может осуществляться только при рабочих напряжениях, вызывающих пластическую деформацию. При наличии между деталью и деформирующим инструментом только упругой связи обработка не производится. При нормальном протекании процесса поверхностного пластического деформирования рабочая часть инструмента внедрена на определенную глубину в обрабатываемую поверхность детали. Нормальное протекание процесса выражается через среднее давление в контакте. В этом случае $p_1 > p > p_2$, где p_1 - давление, при котором рабочие напряжения вызывают пластическую деформацию p_2 - давление в контакте, при котором прекращается пластическое течение и начинается разрушение поверхности детали. При

обкатывании применяют жёсткую или упругую схемы накатывания. При упругой схеме рабочее тело прижимается к обрабатываемой поверхности с помощью какого-либо упругого элемента (винтовой пружины сжатия, блока тарельчатых пружин, пружинящей державки и т.д.), который создаёт необходимую силу накатывания P . При жёсткой схеме упругий элемент в обкатном приспособлении (накатнике) отсутствует. Наличие упругого элемента обеспечивает постоянное усилие обкатывания в любой точке обрабатываемой поверхности. Но из-за погрешности предшествующей обработки пластическая деформация поверхностного слоя оказывается неравномерной и по данной схеме обработки обычно не получается повышение точности формы упрочненных деталей [32, 69]. Жёсткая схема обработки (рисунк1.3) позволяет получать поверхности с высокой точностью размеров и геометрической формы, но при этом требуется большая точность исходной обрабатываемой поверхности перед обкатыванием.

На практике широко используют универсальные однороликовые и одношариковые накатные приспособления, конструкция которых достаточно подробно представлена в литературе [33, 34]. Недостатком однороликовых устройств является незамкнутая система сил, вызывающая деформирование обрабатываемых деталей, устройств и оборудования, быстрое изнашивание подвижных частей технологической системы. Более рационально при обкатывании длинных валов, а во многих случаях и обычных заготовок, применять многорولیковые устройства охватывающего типа. Их конструкция сложнее, но они удобны, надежны и долговечны. В двухроликовом приспособлении обкатывание проводится при симметричном расположении двух ролика на двух взаимосвязанных опорах. Недостаток двухроликовых приспособлений - возникновение изгибающих моментов при несоосной установке роликов и обрабатываемой детали, в результате чего под действием неуравновешенных сил деталь отжимается вверх или вниз, что нарушает жесткость технологической системы и резко ухудшает условия протекания процесса обработки. Поэтому более целесообразно использовать

многороликовые приспособления. Из них самое большое распространение получила компоновка трехроликового накатного приспособления [34]. В нём силы накатывания от каждого ролика (шарика) взаимно уравниваются внутри корпуса приспособления и не передаются на подшипники шпинделя. Кроме того, появляется возможность либо увеличить осевую подачу втрое (при одинаковом диаметре шариков), либо совместить за один рабочий ход упрочняющее (шариком меньшего диаметра) и сглаживающее (шариком большего диаметра) обкатывание.

Центробежная обработка обкатыванием. Центробежная обработка является высокопроизводительным способом пластического деформирования, при котором рабочие элементы (шары или ролики), свободно расположенные в радиальных отверстиях вращающегося диска (упрочнителя), наносят последовательные удары по обрабатываемой поверхности. Рабочие элементы под действием центробежных сил занимают крайнее положение в радиальных отверстиях, а при ударе об обрабатываемую поверхность опускаются на глубину, равную натягу, отдавая энергию, создаваемую центробежной силой [35].

Обработку выполняют на шлифовальных, токарных, фрезерных и других станках. При использовании шлифовальных станков упрочнитель устанавливают на шпинделе шлифовальной бабки. В других случаях производят целевую модернизацию станков.

Ультразвуковая обработка обкатыванием. Ультразвуковая обработка является прогрессивным процессом упрочнения деталей машин [36]. В этом способе к рабочему телу (шарику, ролику, выглаживателю) наряду со статической силой прижима к обрабатываемой поверхности сообщают ультразвуковые колебания, создаваемые специальным генератором.

Гидродробеструйное упрочнение. Сущность гидродробеструйного метода упрочнения заключается в том, что струя рабочей жидкости в смеси со стальными шариками подается под давлением к обрабатываемой поверхности и в результате удара шариков происходит упрочнение поверхности. Для

осуществления этого способа разработаны гидродробеструйные эжекторные установки [37].

Основными преимуществами гидродробеструйного метода упрочнения являются: сохранение сравнительно низкой шероховатости поверхности ($Ra = 1,25 - 0,16$ мкм); улучшение микрогеометрии, так как увеличиваются радиусы закругления впадин и выступов и т.д.

При этом методе упрочнения в качестве инструмента обычно применяют шарики от подшипников из материала ШХ15 с высокой твердостью (HRC 62), имеющие достаточно высокую точность по геометрии и незначительную шероховатость поверхности. Смазывающе-охлаждающей жидкостью часто служит трансформаторное масло, которое применяют для охлаждения зоны контакта шар-тело с целью улучшения микрогеометрии поверхности [39]. Кроме этого, масло является рабочей средой, транспортирующей шарики из исходного нижнего положения и сообщаящей им ускорение, достаточное для совершения удара заданной мощности о поверхность детали.

Недостатком гидродробеструйного метода упрочнения является невозможность упрочнения труднодоступных мест детали: пазов, резьб, глубоких отверстий малого диаметра.

Пневмодробебетное упрочнение. Упрочнение сухой дробью в основном осуществляется на дробеструйных и дробебетных установках. В первом типе установок дроби сообщается кинетическая энергия в дробеструйном сопле сжатым воздухом, подаваемым через воздушную форсунку из заводской сети, во втором типе - в центробежном дробебетном колесе [37].

К основным преимуществам пневмодробебетного упрочнения сухой дробью относится простота конструкции при использовании имеющейся на предприятиях централизованной системы подачи сжатого воздуха; концентрированный поток дроби, позволяющий обрабатывать труднодоступные участки деталей; возможность получения высоких скоростей полета дроби.

Недостатками этого метода упрочнения являются: наличие жесткого удара дробинки о деталь при значительных скоростях полета, что вызывает высокие локальные температуры; кривые остаточных напряжений сжатия имеют значительный подслоный максимум; существенное повышение шероховатости поверхности, поскольку микрогеометрия поверхности определяется неправильной формой и низким качеством поверхности дробинки; нестабильность режима упрочнения [38].

Упрочнение микрошариками. Для повышения сопротивления усталости материала широкое применение нашел метод поверхностного пластического деформирования металлическими или стеклянными гранулами, преимущественно сферической формы – микрошариками (диаметром от 30 до 315 мкм). Обработка ими деталей машин проводится для деталей с острыми кромками ($Ra \leq 0,1$ мм), канавками, проточками, лабиринтными уплотнениями, а также для деталей с резьбами. Использование микрошариков при упрочнении обеспечивает протекание максимальных пластических деформаций вблизи поверхности, а также снижение высоты микронеровностей обработанной поверхности. Указанные благоприятные факторы часто способствуют дополнительному повышению сопротивления деталей по сравнению с другими известными методами дробеструйного наклепа [37].

Наиболее эффективным для упрочнения деталей металлическими микрошариками является дробеметное оборудование. Достоинства такого оборудования состоят в следующем: высокая производительность, возможность одновременного упрочнения нескольких деталей, стабильность обеспечения заданных режимов наклепа, высокая надежность [39].

К недостаткам этого метода упрочнения следует отнести невозможность упрочнения поверхности глубоких отверстий относительно небольшого диаметра.

Вибрационное упрочнение. Объемная вибрационная обработка (виброгалтовка) деталей производится с целью уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности путем сглаживания микронеровностей, а также ее

упрочнения путем создания в поверхностном слое деформационного упрочнения и сжимающих остаточных напряжений.

Физическая сущность процесса объемной вибрационной обработки заключается в том, что частицы рабочей среды (абразивные гранулы, стальные или фарфоровые шарики), загруженные вместе с деталями в контейнер вибрационной машины, получают от последней колебательные движения определенной траектории, амплитуды и частоты [37].

Объемная вибрационная обработка (виброгалтовка) деталей производится с целью уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности путем сглаживания микронеровностей, а также ее упрочнения путем создания в поверхностном слое деформационного упрочнения и сжимающих остаточных напряжений. Вследствие проскальзывания частиц рабочей среды по поверхностям деталей и микроударов по ним происходит съем мельчайших частичек металла и его местная пластическая деформация в точках контакта, что и обеспечивает поверхностное упрочнение.

Соотношение между съемом металла и упрочнением обрабатываемой поверхности зависит от вида и материала частиц рабочей среды, траектории и режимов колебаний. В зависимости от этого различают следующие операции, выполняемые при вибрационной обработке:

- виброшлифование, отличающееся относительно большим съемом металла с обрабатываемой поверхности и шероховатостью в пределах $Ra = 1,25$ - $0,63$ мкм;

- виброполирование, характеризуемое незначительным съемом металла с обрабатываемой поверхности и шероховатостью от $Ra = 0,63$ мкм до $Ra = 0,16$ мкм;

- виброупрочнение, отличительной особенностью которого является применение в качестве частиц рабочей среды стальных полированных шариков или других тел с большой массой. Стальные полированные шарики при пластическом деформировании улучшают шероховатость обработанной поверхности с $Ra = 1,25$ мкм до $Ra = 0,63-0,32$ мкм.

- виброгалтовка осуществляется на специальных установках. На одной и той же вибрационной установке можно производить обработку деталей различными способами.

Недостатком этого метода упрочнения является невозможность упрочнения труднодоступных мест детали: глубоких полостей, глухих отверстий малого диаметра, Т-образных пазов.

1.4 Другие методы упрочнения обработанной поверхности деталей

Метод термопластического упрочнения. Процесс образования остаточных напряжений сквозным нагревом с ускоренным охлаждением получил название «термопластическое упрочнение». В результате анализа экспериментальных работ можно утверждать, что этот метод в отличие от традиционных методов термической обработки (изотермический нагрев, отжиг и т.п.) позволяет не только снимать растягивающие напряжения, но и получать в поверхностном слое благоприятные остаточные напряжения сжатия.

Условием появления температурных остаточных напряжений является неравномерность распределения температур по сечению детали. Величина и характер распространения этих напряжений зависит от температуры нагрева, скорости охлаждения, размеров детали и теплофизических характеристик ее материала. Целенаправленно изменяя эти параметры, можно получить достаточно большие сжимающие остаточные напряжения при значительной глубине их залегания [40].

Схема образования остаточных напряжений по сечению детали представлена на рисунке 1.4. Процесс термопластического упрочнения состоит из двух основных этапов: прогрева детали до температуры начала термопластических деформаций и ускоренного охлаждения ее поверхностей. Время между окончанием нагрева детали и началом охлаждения должно быть минимальным.

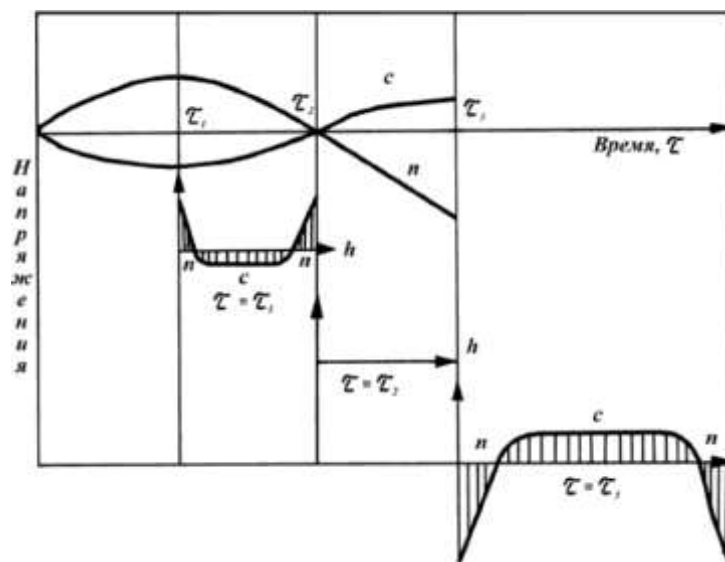


Рисунок 1.4 - Схема образования остаточных напряжений при термопластическом упрочнении: а - изменение температурных напряжений при охлаждении детали (n - поверхность, c - сердцевина); б - распределение температурных напряжений по сечению детали h в разные моменты времени

В начальный период охлаждения ($\tau = \tau_1$) наружные слои детали пытаются сократить свой размер, внутренние же слои, имеющие значительно более высокую температуру, препятствуют этому. В результате поверхность детали окажется растянутой, а сердцевина будет сжата. Если возникающие в этот момент температурные напряжения окажутся выше предела текучести материала для данной температуры, то произойдет пластическая деформация. В дальнейшем интенсивность охлаждения наружных слоев детали уменьшается и постепенно их температура приблизится к температуре окружающей среды. При дальнейшем охлаждении наружные слои практически не деформируются, а сердцевина будет стремиться существенно сократить свой объем. Поэтому в момент окончания процесса охлаждения ($\tau = \tau_3$) сердцевина будет сжимать наружные слои, которые в свою очередь будут растягивать сердцевину. В связи с этим в поверхностном слое упрочненной детали образуются сжимающие остаточные напряжения. Поскольку остаточные напряжения играют важную роль в повышении долговечности работы детали, то сохранение их благоприятного влияния в течение максимального времени эксплуатации

изделия будет иметь важное значение. Метод термопластического упрочнения, как показали исследования, обладает указанным свойством. Установлено, что релаксация (уменьшение) сжимающих остаточных напряжений, созданных методами пластического деформирования, в течение примерно 100 часов эксплуатации при рабочих температурах составляет примерно 80-90%. Для метода термопластического упрочнения эта величина составляет 35-45%. Этот факт свидетельствует о том, что для указанного метода благоприятное воздействие сжимающих остаточных напряжений сохраняется в течение значительно большего времени, что положительно сказывается на времени работы изделия без усталостного разрушения.

Метод термопластического упрочнения является одним из высокоэффективных технологических методов упрочняющей обработки, с помощью которого возможно достижение необходимого уровня предела выносливости детали благодаря созданию в ее поверхностном слое благоприятного напряженного состояния в виде сжимающих остаточных напряжений при минимальной степени наклепа.

Упрочнение наплавкой. Наплавка применяется для упрочнения вновь изготовленных деталей машин и является одним из наиболее гибких методов восстановления и увеличения срока службы изношенных деталей. В практике машиностроения наряду с ручной газовой и электродуговой наплавкой широкое применение получили различные механизированные способы наплавки.

Наиболее широко газовая наплавка применяется для наплавки твердым сплавом и различными тугоплавкими соединениями, обеспечивающими большую твердость и высокую износостойкость. Этот способ наплавки наиболее распространен, так как с его помощью можно получить наплавленные слои толщиной от 0,5 мм и более [37].

Вибродуговой наплавкой можно наращивать на рабочие поверхности деталей слои толщиной 0,3 - 3,0 мм при наплавке в один слой практически без прогрева детали. Однако этот способ имеет существенный недостаток, который заключается в неоднородности структуры и твердости наплавленного слоя.

Неоднородность структуры приводит к образованию значительных внутренних напряжений, микротрещин, снижению предела выносливости и износостойкости. Улучшение эксплуатационных свойств наплавленного слоя может быть достигнуто применением процессов чистовой обработки, например, электромеханическим сглаживанием. Это приводит к повышению твердости и однородности структуры, а также ликвидации микротрещин, что улучшает эксплуатационные свойства деталей с наплавкой.

Упрочнение напылением. Напыление металла наиболее часто осуществляется с помощью электрометаллизации или плазменной обработки. Физико-механические свойства можно регулировать путем использования различных напыляемых материалов и режимов обработки.

При назначении способа металлизации необходимо учитывать ее преимущества и недостатки. К преимуществам следует отнести возможность наращивания слоев материала толщиной до 1,5 мм и более с требуемыми по условиям эксплуатации физико-механическими характеристиками.

Высокая износостойкость металлизированного слоя при наличии смазки достигается вследствие возможности получения повышенной твердости слоя путем применения соответствующего состава напыляемого материала и выбора режимов обработки. Способ металлизации позволяет наносить слои из материалов со специальными свойствами, в результате чего не только увеличивается износостойкость, но и повышаются другие эксплуатационные характеристики, например, жаростойкость и коррозионная стойкость. Свойства металла заготовки вследствие его незначительного нагрева в процессе напыления не изменяются. К преимуществам следует отнести также сравнительную простоту и малую стоимость процесса.

К основным недостаткам способа металлизации относятся хрупкость нанесенного слоя и не всегда достаточная прочность сцепления с металлом заготовки, снижение механической прочности и особенно предела выносливости. Чтобы избежать трещин в напыленном слое и добиться лучшего сцепления его с основным металлом, необходимо стремиться снизить

остаточные напряжения в слое.

Металлизированные детали имеют большую износостойкость при работе со смазкой, а продолжительность их работы в 2 - 3 раза превосходит срок службы цементированных и закаленных деталей.

Наряду с металлизацией в промышленности применяют плазменное напыление материалов со специальными свойствами. По технологическим возможностям этот способ превосходит применяемые способы нанесения покрытий. При этом способе расплавление и распыление тугоплавких материалов осуществляется с помощью высокотемпературной плазменной струи. При плазменном напылении в качестве материала покрытий используется окись алюминия, вольфрам, молибден и др. В соответствии со свойствами наносимых покрытий может быть обеспечена требуемая жаропрочность, сопротивление окислению, износостойкость при высоких температурах и в различных средах [37].

Плазменное напыление покрытий имеет ряд преимуществ по сравнению с защитными покрытиями других видов: сверхвысокие температуры плазменного напыления позволяют расплавлять и наносить различные материалы с высокой температурой их плавления; поток плазмы дает возможность получать сплавы различных материалов, в том числе тугоплавких, теплостойких, и наносить многослойные покрытия; высокая скорость потока газа позволяет увеличивать плотность покрытия до 98% и достичь прочного сцепления с основным металлом заготовки; покрываемая поверхность заготовки нагревается до температуры не выше 200°C, что исключает коробление деталей и позволяет наносить материал на дерево, пластмассы и т.п.

Наиболее часто плазменное напыление используется для нанесения тугоплавких соединений. В этом и других случаях материал покрытия должен обеспечивать защиту от разрушения и окисления основного материала заготовки, хорошую прочность и сцепление с основным материалом, стойкость при циклической термической нагрузке.

На основании анализа литературных источников и в соответствии с целью работы определены задачи исследований:

- Исследование влияния параметров режима резания и получение зависимостей, отражающих влияние скорости резания и подачи на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, просверленных стандартными спиральными сверлами.
- Разработка методологии планирования, организации и проведения экспериментов, объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.
- Разработка эмпирической модели влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий на основании результатов экспериментов.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. Обзор и анализ научно-технической литературы показывает, что для обеспечения высокого качества обработанной поверхности при сверлении отверстий малого диаметра необходимо комплексное управление режимами резания и геометрией инструмента. Глубина дефектного поверхностного слоя определяется совокупным воздействием механических нагрузок и температурных факторов. Твердость поверхностного слоя после сверления часто увеличивается по сравнению с исходным материалом за счет наклепа.

2. Качество поверхностного слоя отверстий, полученных сверлением, существенно влияет на эксплуатационные характеристики изделий — износостойкость, усталостную прочность и коррозионную стойкость. Глубина дефектного поверхностного слоя и изменение твердости поверхности являются ключевыми показателями качества обработки. Влияние режимов резания (скорость резания, подача) и геометрии сверла (углы заточки, форма режущей кромки) на эти параметры требует детального исследования.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований является технологический процесс обработки отверстий быстрорежущими спиральными сверлами.

Предметом исследований является технологическая операция обработки отверстий быстрорежущими спиральными сверлами, обеспечивающая снижение глубины дефектного поверхностного слоя при одновременном упрочнении поверхности отверстий, что позволяет повысить долговечности и качества изделий и снижения трудоемкости их изготовления.

Решение поставленных задач в данной работе осуществляется с использованием основных положений технологии машиностроения, теории обработки резанием, основ материаловедения, математической статистики.

Методология исследований направлена на разработку эмпирической модели, определяющей характер влияния технологических факторов на результаты исследований.

Условия проведения исследований характеризуются независимыми технологическими факторами, подлежащими варьированию в процессе проведения исследований, непосредственно влияющие на зависимые технологические факторы – результаты исследований.

В настоящих исследованиях независимыми технологическими факторами являются параметры режимов резания, а именно скорость резания и подача. Зависимые технологические факторы: глубина дефектного поверхностного слоя отверстий и твердость поверхности отверстий, обработанных спиральными сверлами.

2.1. Методы получения отверстий

Большое значение для результатов экспериментальных исследований имеет выбор станка. Станок должен обеспечить высокую точность обработки и минимальное рассеивание результатов исследований. Помимо этого, станок

должен иметь достаточно широкие пределы скоростей резания и подач и большое их количество при узком диапазоне варьирования. Всеми этими требованиями обладает широкоуниверсальный фрезерный станок повышенной точности модели 675П.

Обрабатываемая деталь может быть установлена на основном столе с вертикальной рабочей плоскостью или на угловом столе с горизонтальной рабочей плоскостью. На станке можно выполнять сверление и рассверливание, долбление, центрование, цекование, зенкерование, развертывание, растачивание. Наличие двух шпинделей горизонтального и поворотного вертикального, а также большого количества принадлежностей к станку, делает его широкоуниверсальным и удобным для работы в инструментальных цехах машиностроительных заводов при изготовлении приспособлений, инструмента, рельефных штампов и прочих изделий.

Станок применяется в единичном и мелкосерийном производстве в инструментальных и механических цехах машиностроительных предприятий

Широкий диапазон оборотов шпинделя и подач, наличие механических подач и быстрых перемещений обеспечивают экономичную обработку различных деталей в оптимальных режимах. В таблице 2.1 приведены обороты шпинделя, скорости резания и подачи на которых проводились настоящие исследования. Такие скорости резания и подачи мог обеспечить только станок 675П.

Таблица 2.1 – Обороты шпинделя n , скорости резания V , и подачи S , применяемые в экспериментальных исследованиях

n , об/мин	V , м/мин	S , мм/об					
65	2,25	0,2	0,25				
80	2,76	0,16	0,2	0,25			
100	3,45	0,13	0,16	0,2	0,25		
125	4,32	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25	
160	5,53	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25

При проведении экспериментальных исследований приспособление должно обеспечивать точность позиционирования заготовки относительно рабочих органов станка, а именно совмещение измерительной и установочных технологических баз и их перпендикулярность относительно оси вертикального шпинделя. При проведении исследований заготовка непосредственно устанавливалась на столе станка, тем самым погрешности базирования заготовки полностью исключались.

При проведении экспериментальных исследований использовались спиральные сверла с коническим хвостовиком по ГОСТ 10903-77 [41], диаметром 11 мм из быстрорежущей стали Р6М5, повышенной точности класса А1 и нормальной точности класса В.

Недостатком стандартных спиральных сверл является наличие цилиндрических участков ленточек на местах подточки, которые трутся о стенки просверливаемого отверстия, что снижает стойкость сверл.

Сверла повышенной точности А1 затачивались по двухплоскостной заточке, на полезную модель которого получен патент Кыргызской Республики [42]. Конструктивные элементы и геометрические параметры контролировались на соответствие стандартам [41, 43, 44] на микроскопе УИМ-23. Методика измерения конструктивных элементов и геометрических параметров инструмента подробно изложены в ряде литературных источниках [45 - 50].

Для лабораторных исследований отбирались сверла с одинаковыми геометрическими параметрами и размерами конструктивных элементов.

После установки сверла в шпиндель станка контролировалось осевое биение режущих кромок сверл микрометром часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленном на магнитном штативе непосредственно на рабочем столе станка.

У сверл повышенной точности класса А1 осевое биение после установки в шпиндель станка не превышало значение 0,06 мм. У сверл нормальной точности класса В1 осевое биение после установки в шпиндель станка имело значение 0,2 мм. У сверл нормальной точности класса В осевое биение после установки в

шпиндель станка имело значение 0,3 мм.

Сверлились заготовки из конструкционной стали Ст45 твердостью 180 НВ. Толщина заготовок 33 мм, соответствовала трем диаметрам сверл 2.1, 2.2).

Предварительно заготовки фрезеровались и шлифовались с шести сторон для обеспечения требуемых качественных характеристик установочных, направляющих и опорных технологических баз (рисунок 2.1).

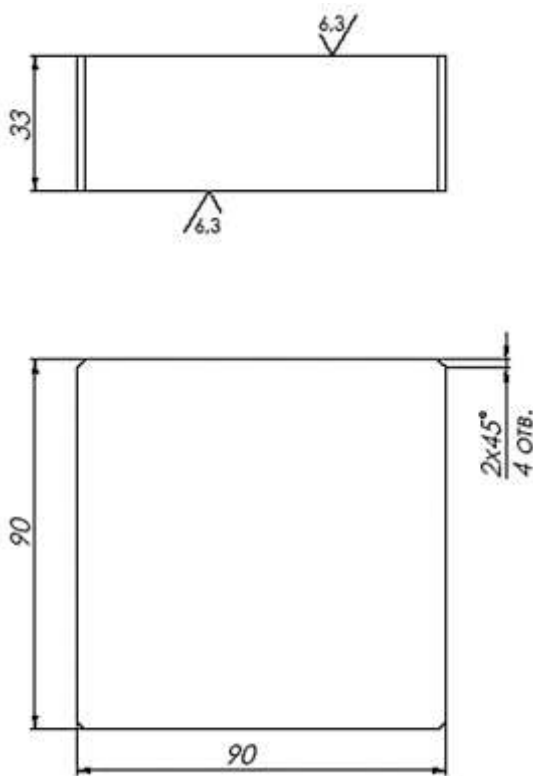


Рисунок 2.1 – Заготовка до сверления

Сверлились сквозные отверстия с поливом смазочно-охлаждающей жидкостью – 5% раствор Укринола 1. Схема сквозного сверления заготовки представлена на рисунке 2.2.

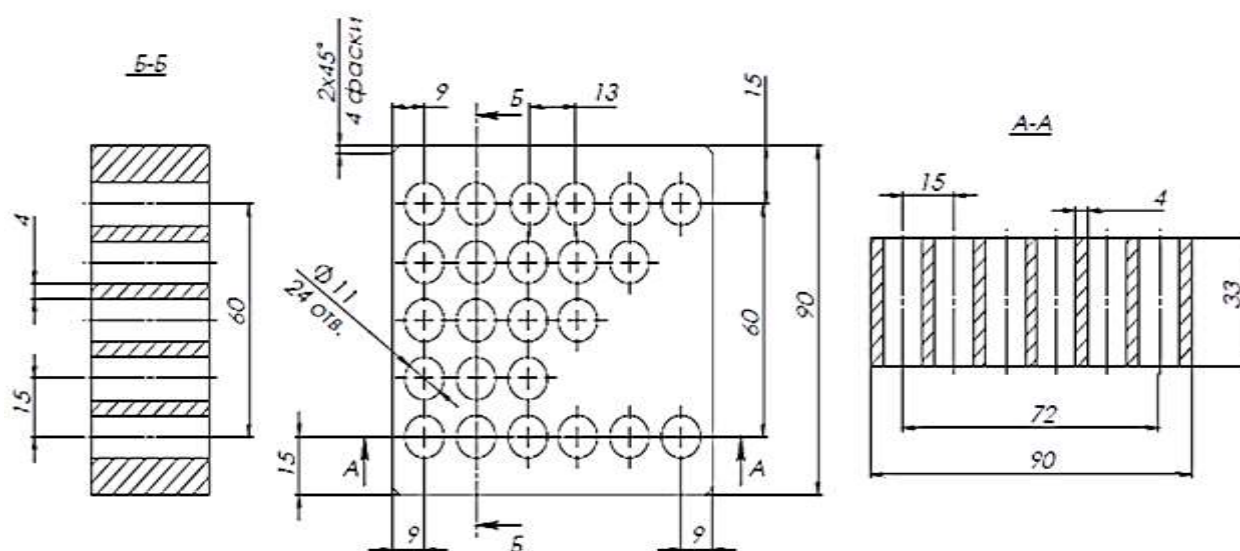


Рисунок 2.2 – Схема сквозного сверления заготовки

2.2. Методы контроля качества поверхностного слоя просверленных отверстий

Качество поверхностного слоя просверленных отверстий характеризуется двумя показателями: глубиной дефектного поверхностного слоя и упрочнением поверхности отверстий. Для исследования глубины дефектного поверхностного слоя δ исследовалась микроструктура поверхностного слоя отверстий при сверлении стандартными спиральными сверлами нормальной точности класса В и спиральными сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части.

Для исследования микроструктуры поверхностного слоя просверленных отверстий использовался световой микроскоп Axio Imager A1m/M1m при 200 кратном увеличении (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 - Световой микроскоп Axio Imager A1m/M1m

Основные технические характеристики светового микроскопа Axio Imager A1m/M1m представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Технические характеристики светового микроскопа Axio Imager A1m/M1m

Количество вариантов конфигурации штатива	23
Дифференциально-интерференционный контраст DIC и PlasDIC для пластиковой посуды	Недорогой контраст для неокрашенных образцов
Интегрированные светодиоды	стабильное нейтральное освещение в проходящем свете
Варианты флуоресценции	светодиодное, ртутное и ксеноновое освещение
Рабочее пространство образца поддерживает толщину	от 0 до 110 мм
Эргономический привод столика может двигаться в пределах	90 мм по оси Y
Кратность увеличения Nм	50, 100, 200, 500, 1000

Металлографический микроскоп позволяет рассматривать непрозрачные тела в отраженном свете. Изображение предмета увеличивается в микроскопе

дважды: в объективе и в окуляре. Поэтому общее увеличение микроскопа N_m равно произведению увеличения объектива $n_{об}$ на увеличение окуляра $n_{ок}$:

$$N_m = n_{об} \times n_{ок}. \quad (2.1)$$

Главное увеличение или максимально полезное увеличение микроскопа обеспечивается объективом. Оно определяется разрешающей способностью объектива. Разрешающая способность объектива – минимальное расстояние, на котором две близлежащие точки еще видны отдельно.

Окуляры предназначены для увеличения изображения, полученного объективом, а также для исправления оптических недостатков объективов.

Общий вид и краткое описание металлографического микроскопа «Axio Imager».

На рисунке 2.4 представлена схема светового металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m, который является серией прямых микроскопов, созданных с учетом последних разработок в области микроскопии и подходящий для решения самых различных задач.

Оснащение микроскопа может выбираться в зависимости от индивидуальных требований: ручное и моторизованное управление. В данной исследовательской работе используется ручное управление. Новые методы контрастирования (дифференциально-интерференционный контраст с простой и круговой поляризацией) позволяют найти особенности структур конструкционных материалов, а также определять микротрещины или другие тончайшие дефекты поверхности микрошлифа.

Технические возможности и описание металлографического микроскопа (оптическая схема, основные узлы, кнопки управления)

Общее увеличение от 50 до 1000, автофокусировка, револьверное устройство на 6 объективов, диффузионный диск для отраженного света, бинокулярный фототубус 30°/23 (30vis:70doc), объективы EC “Epiplan-Neofluar” 5x, 10x, 20x, 50x, 100x, конденсор Achromatic-aplanatic 0.9N Pol, окуляр W-PL 10x/23 Br.foc., видео комплект анализа изображений.

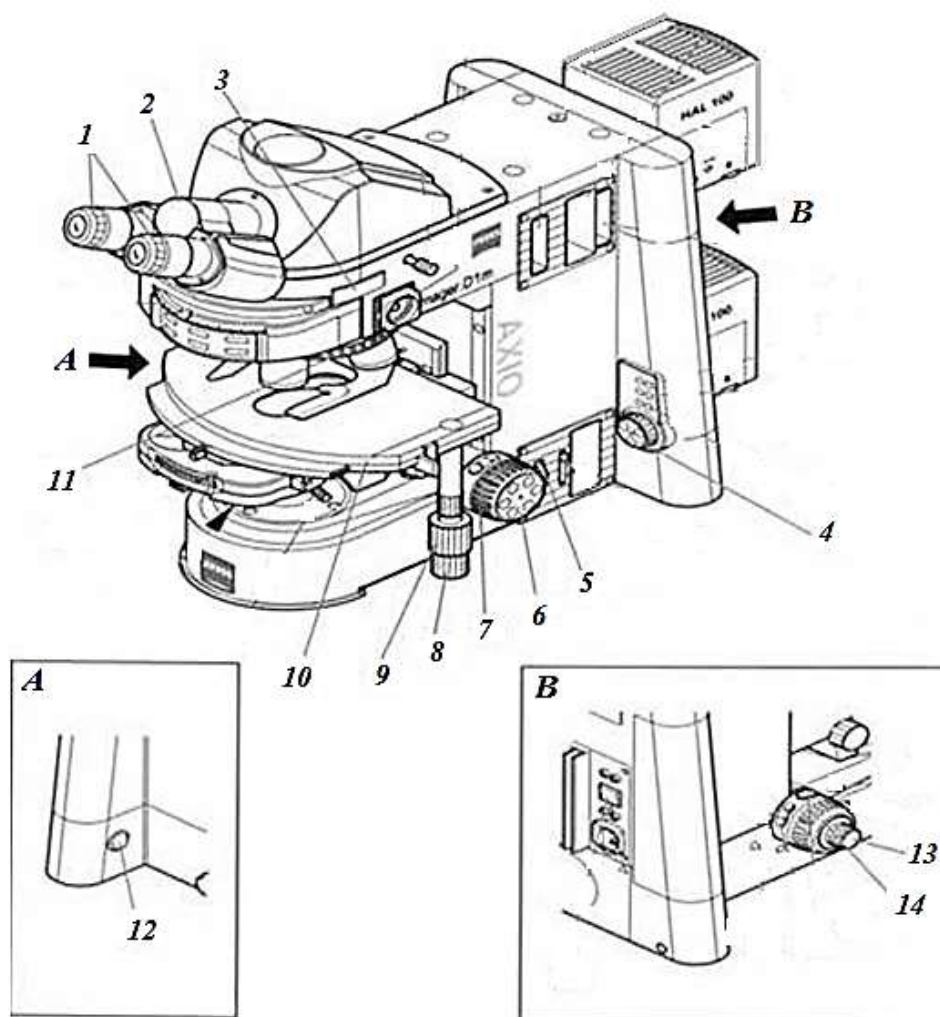


Рисунок. 2.4 - Схема светового металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m

1 - окуляры (оптического прибора); 2 - бинокулярная трубка; 3 - слот для слайдера (ползунок) анализатора (используется, только если траектория преломления камеры, слева, не установлена); 4 - контроль интенсивности света; 5 - диск (штурвал) управления для люминисцентной диафрагмы осветителя микроскопа; 6 - фокусирующий привод - точный регулятор фокусировки, справа; 7 - фокусирующий привод - грубый (с крупным шагом) регулятор фокусировки, справа; 8 - ручка управления передвижением механической платформы по оси X; 9 - ручка управления передвижением механической платформы по оси Y; 10 - механическая платформа; 11 - наконечник (сопло) объектива (для установки объективов); 12 - выключатель/включатель; 13 - фокусирующий привод - точный регулятор фокусировки, слева; 14 - фокусирующий привод – грубый (с большим шагом) регулятор

Порядок и особенности работы на микроскопе «Axio Imager» При микроанализе исследуемый объект помещают на механическую платформу 10. Для возможности исследования различных участков поверхности предусмотрено перемещение с помощью ручки управления передвижения механической платформы по оси X 8 и управления механической платформы по оси Y 9. Степень увеличения изменяют путем передвижения револьверного устройства 11 и окуляра 1. Путем настройки регулятора фокусировки 6 получаем точную фокусировку, а регулятора фокусировки 7 получаем грубую фокусировку (с крупным шагом). При этом к микроскопу подключен компьютер. Микроскоп может быть оснащен цифровым фотоаппаратом или цифровой видеокамерой для документирования полученных изображений. Наличие компьютера позволяет участвовать в эксперименте одновременно нескольким исследователям, коллегиально обсуждать результаты микроанализа, видимые на экране дисплея. Все это способствует получению более объективных результатов.

Окуляры 1 (оптического прибора все типы окуляров “Br. foc”) соответствуют (подходят) регулятору (контролирующему устройству) для компенсации аметропии (в офтальмологии) глаз пользователя. Кроме того, они позволяют подогнать сетку окуляров.

Бинокулярные трубки 2 позволяют осуществлять индивидуальные настройки межзрачкового расстояния и высоты обзора посредством поворачивания панелек окуляра в пределах настроек. Трубки позволяют, в зависимости от модели, настроить высоту обзора в диапазоне 50 мм и предоставляют угол обзора в 15, 20, 30 градусов. Используются вместе с соответствующими адаптерами.

Бинокулярные фототрубы (фотоэлементы) позволяют установить камеры на выбор пользователя. Оптический путь выбирается посредством руля высоты, которая находится с правой стороны трубки и имеет 2 или 3 позиции.

Слот для слайдера (ползун) анализатора 3 для приспособления (процесс перефокусировки глаза с предмета на предмет) ползунка анализатора или ползунка линзы Бертрана РН (453671-0000-000).

Штурвал управления светящийся (световой) диафрагмой осветителя микроскопа 5 передает яркость. Револьверный держатель (объектива микроскопа) 11 в зависимости от модели, оборудован 5-6 объективами М27 (предметного стекла (для микроскопа)) со слотами для *DIC* слайдера (ползунок). Фокусирующий механизм – регулятор тонкой фокусировки с левой стороны 13, фокусирующий механизм – регулятор грубой фокусировки с левой стороны 14 регулируют тонкую и грубую фокусировку соответственно.

2.2.1. Контроль глубины дефектного поверхностного слоя

Изучение с помощью светового микроскопа структуры металлов возможно лишь при достаточно интенсивном отражении световых лучей от исследуемой поверхности. Поэтому, поверхность образца должна быть специально приготовлена. Образец металла, специально приготовленный для исследования его структуры под микроскопом, называется микрошлифом.

Поверхность образца, на которой проводят металлографическое исследование, подвергают специальной обработке, состоящей из ряда последовательных операций:

- грубая шлифовка (для выравнивания поверхности среза или излома образца);
- тонкая шлифовка;
- полировка;
- травление.

Грубая шлифовка, осуществляется на шлифовально - полировочной установке «*PRESI Mintech 233*» (рисунок 2.5), с применением наждачной бумаги марки *P60* зернистостью от (размер зерна 250...315 мкм) до *P180* (размер зерна 63...80 мкм) последовательно уменьшая размер зерна. Обработку производят на 5 номерах наждачной бумаги. *Mintech 233* – ручная однодисковая шлифовально-

полировальная машина с варьируемой скоростью вращения имеет удобное управление сенсорного дисплея, которым можно управлять временем, скоростью вращения диска, нагрузкой P , подачей струи воды (рисунок 2.6).

Направление вращения наждачного круга при смене зернистости наждачной бумаги следует изменять на противоположное. После окончания шлифования образец промывают струей воды для удаления частиц абразива и металла.



Рисунок 2.5 - Шлифовально-полировочная установка « PRESI Mintech 233»



Рисунок 2.6 - Сенсорный дисплей шлифовально-полировочной установки « PRESI Mintech 233»

Технические характеристики шлифовально-полировочной установки «PRESI Mintech 233» представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Технические характеристики шлифовально-полировочная установка «*PRESI Mintech 233*»

Шлифовальный круг (<i>Mintech 233</i>)	Ø 200 и 250 мм
Защита корпуса от химических воздействий	+
Варьируемая скорость вращения:	20-700 об/мин
Индикатор давления на образец	+
Вращение в двух направлениях	+
Удобное управление с помощью цветного сенсорного дисплея	+
Функция памяти методик	+
Встроенный мульти-распылитель воды	+
Питание	230V, 1 фаза/ 50Hz
Таймер	+
Габариты (ШхГхВ)	620 x 875 x 330 мм
Вес	42 кг

Тонкая шлифовка также осуществляют на шлифовально-полировочной установке «*PRESI Mintech 233*», (рисунок 2.5). Обработку производят на 4 номерах наждачной бумаги последовательно уменьшая размер зерна: P240 (размер зерна 50..63 мкм), P 280 (размер зерна 40..50мкм), P 400 размер зерна 28..40мкм), P 600 (размер зерна 20..28 мкм). При смене зернистости наждачной бумаги направление вращения наждачного круга изменяется на противоположное.

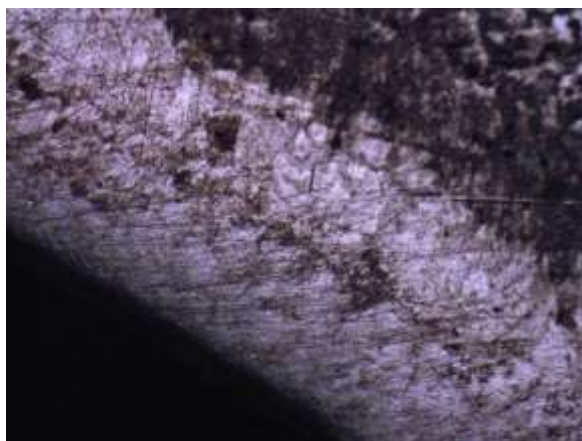


Рисунок 2.7 - Поверхность, наблюдаемая на окуляре металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m образца после тонкого шлифования, при увеличении x200

Полировка также осуществляется на шлифовально-полировочной установке «*PRESI Mintech 233*». Полировку производят нескольких номерах наждачной бумаги последовательно уменьшая размер зерна: Р 1200 (размер зерна 10..14 мкм), Р 1500 (размер зерна 7..10 мкм), Р 2500 размер зерна 3..5 мкм). Полировка удаляет оставшиеся после шлифования мелкие дефекты поверхности, риски (рисунок 2.8). Для полировки используется абразив в виде суспензии или пасты, который наносится на подкладку специальной ткани, прикрепленной к шлифовальному кругу шлифовально-полировочной установки.



Рисунок 2.8 - Процесс полирования на полировочном установке «*PRESI Mintech 233*» со специальным материалом.

В качестве абразивов применяются порошки окиси алюминия. В качестве жидкости для приготовления суспензии или пасты используют дистиллированную воду. Полирование считается законченным, когда поверхность образца приобретает зеркальный блеск и под микроскопом не видны риски и царапины.

В процессе шлифовально-полировочных работ во избежание изменений микроструктуры исследуемого материала вследствие повышения температуры периодически замеряется температура поверхностного слоя с помощью цифрового термометра Greisinger GTN 1170 (рисунок 2.9). Этот термометр может отображать измерения на цифровом экране, имеет высокую точность, стабильность и быструю реакцию на изменения температуры, низкую погрешность работы ($\pm 0,05 \%$) в широком диапазоне температур ($65 + 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$).



Рисунок 2.9 - Замер температуры поверхностного слоя с помощью цифрового термометра Greisinger GTN 1170

Термометр Greisinger GTN 1170 предназначен для моментального измерения температуры. Устройство оснащено дополнительными функциями, такими как: удержание данных, отображение максимального/минимального значения, автоматическое отключение. Функция корректировки смещения позволяет корректировать температуру на заданный оператором показатель (в плюс или минус). Устройство оснащено разъемом для мини-штекера и поддерживает датчики температуры NiCr-Ni типа К (см. дополнительные аксессуары).

Изучение полированного образца под микроскопом не выявляет внутреннего строения сплава. Объяснение этого явления показано на рисунке 2.10.

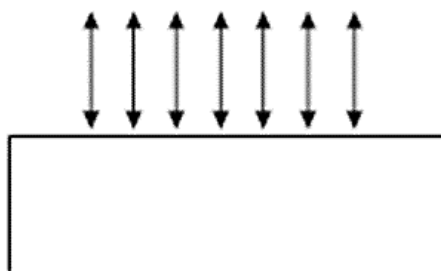


Рисунок 2.10 - Отражение лучей света от полированной поверхности.

Пучок света, пройдя конденсорную линзу (имеет одинаковую плотность и интенсивность по сечению пучка), нормально падает на полированную поверхность. Каждый луч, отразившись от поверхности и сменив направление на 180° , направляется в оптическую систему микроскопа и достигает глаза наблюдателя. Поскольку от каждой точки микрошлифа отражается луч света одинаковой интенсивности, то наблюдатель видит в окуляре равномерно окрашенное в белый цвет поле микрошлифа.

После полировки заготовку исследовали под микроскопом Axio Imager A1m/M1m при 200 кратном увеличении (рисунок 2.11).

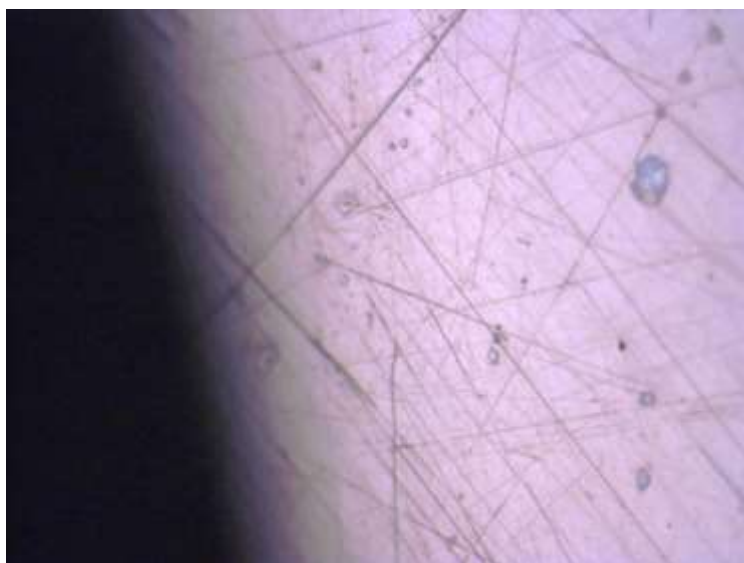


Рисунок 2.11 - Поверхность, наблюдаемая на окуляре металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m образца после полирования, при увеличении x200

Травление заготовки производилось 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте (рисунок 2.12).

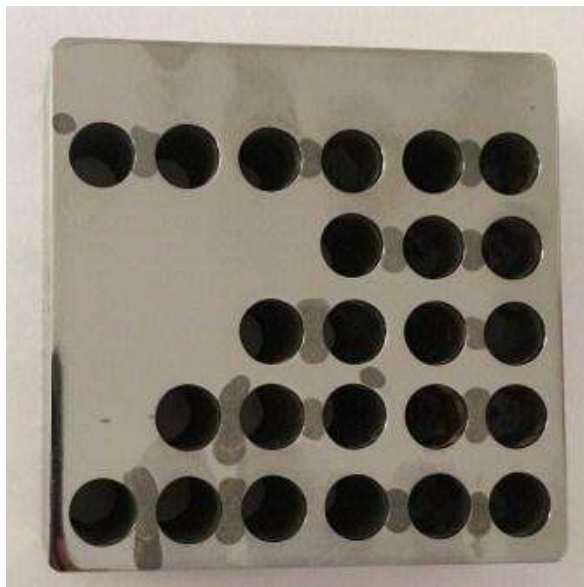


Рисунок 2.12 - Заготовка после травления

Травление позволяет выявить микроструктуру полированного образца. После травления неоднородные участки металла или сплава становятся видимыми под микроскопом. После травления микрошлиф промывают водой и спиртом и высушивают воздухом.

Сущность процесса травления заключается в различной степени растворения или окрашивания отдельных структурных составляющих – зёрен чистых металлов, твердых растворов, химических соединений. Различные структурные составляющие обладают разным электродным потенциалом. Когда полированная поверхность сплава покрыта травителем, являющимся электролитом, одни структурные составляющие сплава, имеющие отрицательный электродный потенциал, будут являться анодами и поэтому растворяются. Другие структурные составляющие, имеющие положительный электродный потенциал, становятся катодами остаются неизменными. Так как таких анодных и катодных участков много, то в результате травления на

поверхности микрошлифа образуются многочисленные впадины и выступы, которые и характеризуют микроструктуру сплава.

При освещении протравленного микрошлифа на металлографическом световом микроскопе Axio Imager A1m/M1m лучи света будут по разному отражаться от различно протравившихся структурных составляющих. Структурные составляющие, протравившиеся слабо, отражают больше лучей света и выглядят светлыми; структурные составляющие, протравившиеся сильно, отражают меньше лучей света и выглядят тёмными. Таким образом, на различном состоянии поверхности и количестве отраженных лучей и основано выявление структуры данного сплава ст45.

Микроструктура, наблюдаемая на окуляре металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m образца после травления, при увеличении $\times 200$ представлена на рисунке 2.13.

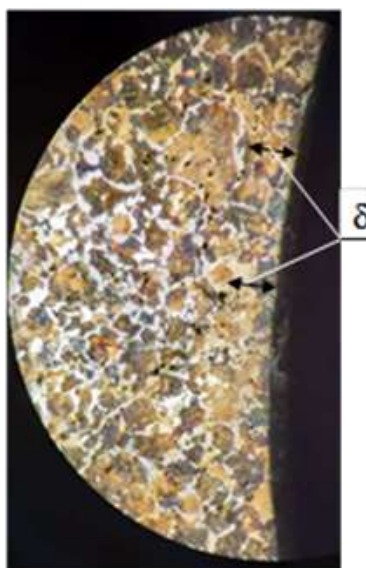


Рисунок 2.13 - Микроструктура, наблюдаемая на окуляре металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m образца после травления, при увеличении $\times 200$, где δ - глубина дефектного поверхностного слоя отверстий.

Исследование глубины дефектного слоя δ при сверлении отверстия проводилось в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.14.

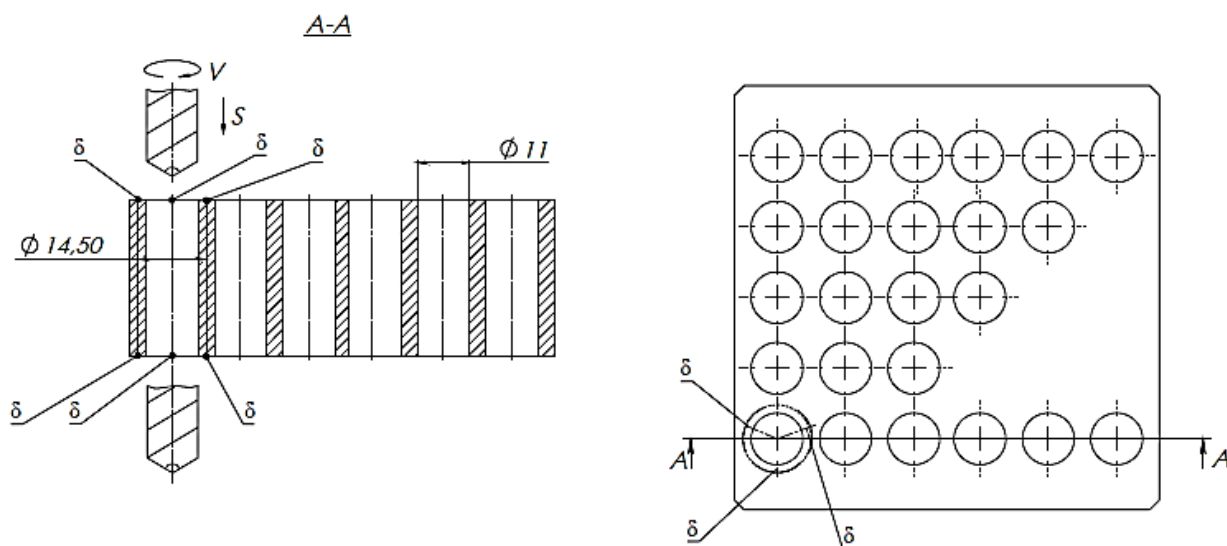


Рисунок 2.14 – Схема исследования глубины дефектного поверхностного слоя δ отверстий при сверлении наблюдаемая на окуляре металлографического микроскопа Axio Imager A1m/M1m

2.2.2 Контроль упрочнения поверхностного слоя отверстий

Справочная литература [51] рекомендует оценивать величину упрочнения поверхностного слоя обработанной поверхности степенью наклепа. При этом степень наклепа определяется из отношения разности максимальной поверхностной микротвердости после обработки и исходной микротвердости обрабатываемого материала к исходной микротвердости обрабатываемого материала, помноженной на 100%. Степень наклепа справочником не регламентируется и в технической литературе отсутствуют результаты исследований, направленных на определение характера и степени влияния параметров режима резания на глубину и степень наклепа дефектного поверхностного слоя при обработке резанием.

Известно, что микротвердость это твердость отдельных участков микроструктуры материала, отдельных фаз и структурных составляющих, твердость внутри отдельных зерен (для конструкционных доэвтектоидных сталей это зерна феррита и перлита).

В работе [52] показано существенное влияние твердости обрабатываемого материала на стойкость быстрорежущих спиральных сверл. Поэтому в настоящих исследованиях степень упрочнения поверхностного слоя

просверленных отверстий определялась измерением твердости поверхности отверстий по методу Роквелла в единицах HRC (рисунок 2.15).

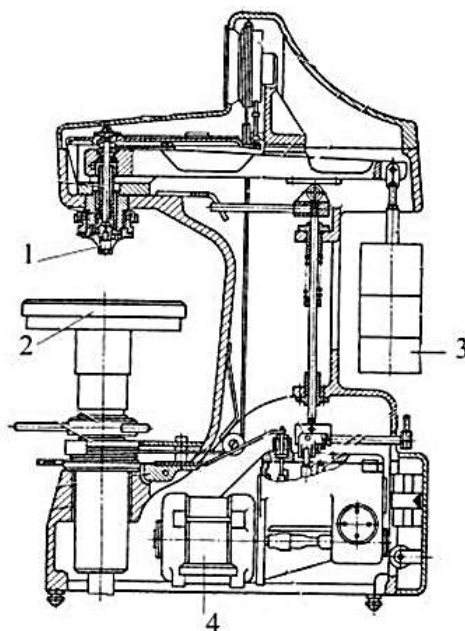


Рисунок 2.15 – Схема твердомера Роквелла 1 – оправка с индентором, 2 – предметный столик, 3 – грузы, 4 – электродвигатель

Технические характеристики твердомера Роквелла представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4- Технические характеристики твердомера Роквелла

Испытательные нагрузки для шкал Роквелла, Н	предварительная.98,1; основные 588,4; 980,7; 1471
Диапазоны измерений твердости по шкалам Роквелла	HRA от 20 до 88; HRB от 20 до 100; HRC от 20 до 70
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерения твёрдости	1,0-3,0 %
Рабочее пространство по вертикали (регулируемое), мм	170
Глубина рабочего пространства, не менее, мм	135
Габаритные размеры	466x238x630

При измерении твердости по Роквеллу в качестве индентора использовались алмазный конус с углом при вершине 120°.

Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом в испытуемый образец под действием последовательно прикладываемых предварительной (F_0) и основной (F_1) нагрузок и в измерении остаточной глубины проникновения этого наконечника после снятия основной нагрузки (рисунок 2.16).

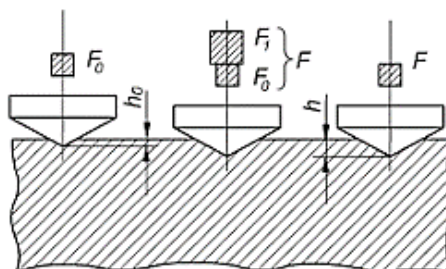


Рисунок 2.16 – Схема измерения твердости по Роквеллу

Для обеспечения возможности применения индентора с алмазным наконечником для измерения твердости обработанной поверхности просверленные заготовки фрезеровались в плоскостях параллельных продольным осям каждого ряда отверстий (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 - Исследуемые образцы

Измерение твердости по Роквеллу осуществляется в строгом соответствии с ГОСТ 9013–59 (в редакции 2001 г.) [53].

Измерение твердости проводится при температуре $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$. Опорные поверхности столика и подставки, а также опорные и рабочие поверхности образца (или изделия) должны быть очищены от посторонних веществ (окалины, смазки и др.).

Образец должен быть установлен на столике или подставке устойчиво во избежание его смещения и прогиба во время измерения твердости (рисунок 2.22). При измерении твердости прибор должен быть защищен от вибрации и ударов.



Рисунок 2. 18 – Измерение твердости поверхности, обработанной сверлением

При измерении твердости должны соблюдаться следующие условия:

- плавное приведение наконечника в контакт с рабочей поверхностью образца (или изделия);
- плавное приложение предварительного F_0 и основного F_1 (в течение 2 - 8 с) усилий;

- плавное снятие основного усилия F_1 через 1 - 3 с после резкого замедления или остановки стрелки индикатора (или изменения показаний цифрового отсчетного устройства).

Для металлов, при измерении твердости которых резкого замедления или остановки стрелки индикатора (или изменения показаний цифрового отсчетного устройства) не наблюдается, время выдержки под общим усилием F должно составлять от 10 до 15 с.

Расстояние между центрами двух соседних отпечатков должно быть не менее четырех диаметров отпечатка (но не менее 2 мм). Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее 2,5 диаметра отпечатка (но не менее 1 мм) (рисунок 2.19).

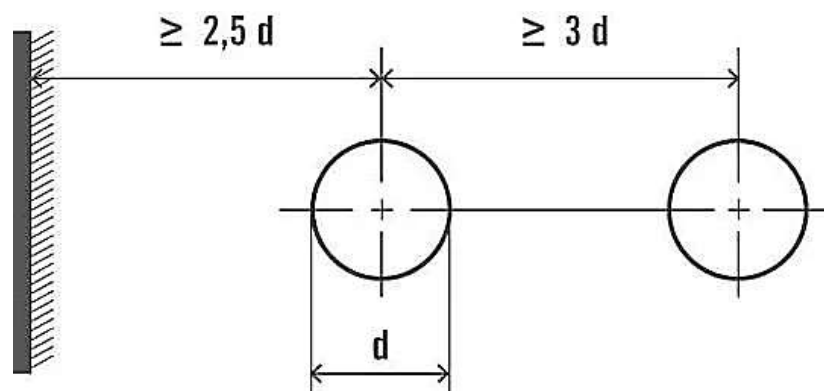


Рисунок 2.19 - Минимальные значения расстояния до отпечатка и кромки при методе по Роквеллу

На опорной поверхности образца (или изделия) не должно наблюдаться следов деформации от отпечатка.

Число твердости по Роквеллу определяется по шкале индикатора с округлением до 0,5 единицы твердости. Измерение твердости производилось по 5 точкам по длине в соответствии со схемой, представленной на рисунке 2.20.

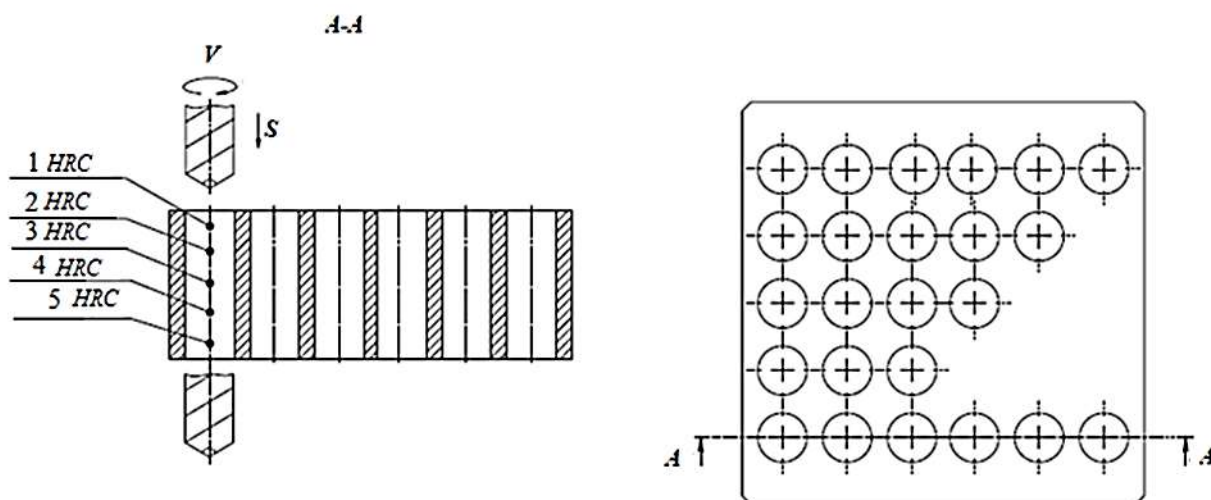


Рисунок 2.20 – Схема определение твердости поверхности отверстий при сверлении сверлами

2.3. Методы статистического анализа экспериментальных данных

Корреляционный и регрессионный анализ – это методы математической статистики, позволяющие выявлять связь между двумя величинами, значения которых получают в результате статистических наблюдений. Основная задача корреляционного анализа – оценивание тесноты связи между величинами, а регрессионного – установление ее вида

В то же время ряд исследователей объединяет эти методы в корреляционно-регрессионный анализ, что имеет под собой некоторые основания: наличие целого ряда общих вычислительных процедур, взаимодополнения при интерпретации результатов и др.

Поэтому в данном контексте можно говорить о корреляционном анализе в широком смысле – когда всесторонне характеризуется взаимосвязь. В то же время выделяют корреляционный анализ в узком смысле – когда исследуется сила связи – и регрессионный анализ, в ходе которого оцениваются ее форма и воздействие одних факторов на другие.

Задачи собственно корреляционного анализа сводятся к измерению тесноты связи между варьирующими признаками, определению неизвестных

причинных связей и оценке факторов, оказывающих наибольшее влияние на результативный признак.

Задачи регрессионного анализа лежат в сфере установления формы зависимости, определения функции регрессии, использования уравнения для оценки неизвестных значений зависимой переменной.

Коэффициент корреляции является одной из статистических мер наличия и значимости связи между двумя случайными переменными. Он показывает, насколько явно выражена тенденция к изменению одной случайной переменной при изменении другой, т.е. подтверждает наличие зависимости случайных переменных величин, но не определяет вид этой зависимости [54].

Таким образом, встает необходимость использования методов корреляционного анализа при обработке статистических данных для последовательного решения следующих задач:

- изучение коэффициента корреляции между случайными переменными величинами;
- определение уравнения регрессии и расчет его параметров.

Наиболее часто используют коэффициент линейной корреляции Пирсона. Данный коэффициент характеризует тесноту и направление связи между двумя коррелируемыми признаками в случае наличия между ними линейной зависимости. Для правомочности применения коэффициента Пирсона предварительно необходимо убедиться, что распределение сравниваемых случайных переменных нормальное, т.е. подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

2.3.1. Методика определения закона распределения случайной величины

Случайная величина полностью характеризуется законом распределения, который устанавливает связь между возможными ее значениями и соответствующими им вероятностями. Исходя из основополагающих принципов математической статистики, распределение случайной величины, подверженной

влиянию большого числа взаимно независимых случайных факторов следует описывать законом Гаусса. На основании этого предположения проводится проверка соответствия распределения закону Гаусса по методике ГОСТ 8.736-2011[55] для выборок малого объема ($15 < n < 50$). Последняя рекомендована на основании того, что для малых выборок такие общепринятые критерии, как χ^2 Пирсона или ω^2 Мизера - Смирнова неэффективны.

При числе результатов наблюдений $n < 50$ нормальность их распределения проверяют при помощи составного критерия.

Критерий 1

Вычисляют отношение $\bar{d}$

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^*} \quad (2.2)$$

где, S^* - смещенная оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле [77]

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (2.3)$$

Результаты наблюдений группы можно считать распределенными нормально, если

$$d_{1-\frac{q_1}{2}} < \bar{d} < d_{\frac{q_1}{2}},$$

где, $d_{1-\frac{q_1}{2}}$ и $d_{\frac{q_1}{2}}$ - квантили распределения, получаемые из таблицы 2.5 по числу результатов наблюдений n , $\frac{q_1}{2}$ и $(1 - \frac{q_1}{2})$, причем q_1 заранее выбранный уровень значимости критерия (табл. 2.5).

Таблица 2.5 - Квантили распределения $d_{1-\frac{q_1}{2}}$ и $d_{\frac{q_1}{2}}$

n	$\frac{q_1}{2} \ 100\%$		$\left(1 - \frac{q_1}{2}\right) \ 100\%$	
	1%	5%	95%	99%
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950
26	0,8901	0,8686	0,7040	0,7360
31	0,8826	0,8625	0,7110	0,7404
36	0,8769	0,8578	0,7167	0,7440
41	0,8722	0,8540	0,7216	0,7470
46	0,8682	0,8508	0,7256	0,7496

Критерий 2

Считается, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению, если не более m разностей $|X - \bar{X}|$ превзошли значение $z_{P/2}S$, где S – оценка среднего квадратического отклонения, вычисляемая по формуле [78]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (2.4)$$

где, $z_{P/2}$ – верхний квантиль распределения нормальной функции Лапласа, отвечающей вероятности $P/2$. Значение P определяется по таблице 2.6 по выбранному уровню значимости q_2 и числу результатов наблюдений n .

При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице 2.6, значение P находят путем линейной интерполяции.

Таблица 2.6 – Значения P для вычисления $Z_{p/2}$

n	m	$q_2 \cdot 100\%$		
		1%	2%	5%
10	1	0,98	0,98	0,96
11-14	1	0,99	0,98	0,97
15-20	1	0,99	0,99	0,98
21—22	2	0,98	0,97	0,96
23	2	0,98	0,98	0,96
24—27	2	0,98	0,98	0,97
28—32	2	0,99	0,98	0,98
33—35	2	0,99	0,98	0,98
36—49	2	0,99	0,99	0,98

Зависимость $Z_{p/2}$ от P приведена в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Зависимость $Z_{p/2}$ от P

P	$Z_{p/2}$	P	$Z_{p/2}$
0,96	2,06	0,98	2,33
0,97	2,17	0,99	2,58

При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице 2.6 значение P находят путем линейной интерполяции. При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

2.3.2 Методы корреляционного анализа экспериментальных данных

Для определения наличия и тесноты связи наиболее часто используют коэффициент линейной корреляции Пирсона. Для этого предварительно

составляется таблица, в которую заносятся фактические значения случайных переменных величин, как показано в таблице 2.8.

Таблица 2.8 - Исходные данные для определения коэффициента корреляции Пирсона

№	y_i	x_i	$(y_i - \bar{y})$	$(y_i - \bar{y})^2$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})$
1	y_1	x_1	$(y_1 - \bar{y})$	$(y_1 - \bar{y})^2$	$(x_1 - \bar{x})$	$(x_1 - \bar{x})^2$	$(y_1 - \bar{y})(x_1 - \bar{x})$
2	y_2	x_2	$(y_2 - \bar{y})$	$(y_2 - \bar{y})^2$	$(x_2 - \bar{x})$	$(x_2 - \bar{x})^2$	$(y_2 - \bar{y})(x_2 - \bar{x})$
3	y_3	x_3	$(y_3 - \bar{y})$	$(y_3 - \bar{y})^2$	$(x_3 - \bar{x})$	$(x_3 - \bar{x})^2$	$(y_3 - \bar{y})(x_3 - \bar{x})$
n	Y_n	X_n	$(y_n - \bar{y})$	$(y_n - \bar{y})^2$	$(x_n - \bar{x})$	$(x_n - \bar{x})^2$	$(y_n - \bar{y})(x_n - \bar{x})$

Коэффициент линейной корреляции Пирсона определяется по формуле

$$r = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \sum(x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.5)$$

Теснота связи случайных переменных величин определяется по уровню значимости коэффициента корреляции по таблице 2.9 в зависимости от числа степеней свободы $k = n-2$, где n – размер выборки [Таблица XII, 65].

Таблица 2.9 - Коэффициент корреляции Пирсона (критические значения)

Число степеней свободы $k = n-2$	Уровень значимости для одностороннего критерия				
	0,05	0,25	0,01	0,005	0,0005
	Уровень значимости для двустороннего критерия				
	0,1	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,988	0,997	0,9995	0,9999	0,99999
2	0,900	0,950	0,980	0,990	0,999
3	0,805	0,878	0,934	0,959	0,991
4	0,729	0,811	0,882	0,971	0,974
5	0,669	0,755	0,833	0,875	0,951
6	0,621	0,707	0,789	0,834	0,928

продолжение таблицы 2.9

7	0,582	0,666	0,750	0,798	0,898
8	0,549	0,632	0,715	0,765	0,872
9	0,521	0,602	0,685	0,735	0,847
10	0,497	0,576	0,658	0,708	0,823
11	0,476	0,553	0,634	0,684	0,801
12	0,457	0,532	0,612	0,661	0,780
13	0,441	0,514	0,592	0,641	0,760
14	0,426	0,497	0,674	0,623	0,742
15	0,412	0,482	0,558	0,606	0,725

2.3.3. Методы регрессионного анализа статистических зависимостей

Кривые графиков экспериментальных исследований являются статистическими зависимостями, полученными усреднением нескольких измерений в каждой точке, поэтому аппроксимация этих зависимостей проводилась методом наименьших квадратов. Определялись коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей: прямой, степенной и экспоненциальной. Затем рассчитывался коэффициент корреляции каждой из них, и методом сравнительного анализа определялась зависимость наиболее адекватная результатам исследований.

Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии линейной зависимости ($y = a + bx$) представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии линейной зависимости

№	y_i	x_i	y_i^2	$y_i x_i$	x_i^2	$y_i + x_i$	$(y_i + x_i)^2$
1	y_1	x_1	y_1^2	$y_1 x_1$	x_1^2	$y_1 + x_1$	$(y_1 + x_1)^2$
2	y_2	x_2	y_2^2	$y_2 x_2$	x_2^2	$y_2 + x_2$	$(y_2 + x_2)^2$
3	y_3	x_3	y_3^2	$y_3 x_3$	x_3^2	$y_3 + x_3$	$(y_3 + x_3)^2$
n	y_n	x_n	y_n^2	$y_n x_n$	x_n^2	$y_n + x_n$	$(y_n + x_n)^2$
Σ	Σy_i	Σx_i	Σy_i^2	$\Sigma y_i x_i$	Σx_i^2		$\Sigma (y_i + x_i)^2$

В таблицу 2.10 заносятся статистические результаты испытаний, для которых исследовали характер взаимозависимости, у – объект исследований, х – независимый переменный фактор.

Для определения коэффициентов регрессии линейной статистической зависимости в таблицу 2.10 заносятся фактические значения х и у. Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\sum (y_i + x_i)^2 = \sum x_i^2 + 2\sum x_i y_i + \sum y_i^2. \quad (2,6)$$

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n\sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (2,7)$$

$$\alpha = \frac{(\sum y_i - b\sum x_i)}{n}. \quad (2.8)$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n\sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}}. \quad (2.9)$$

Если значение коэффициента корреляции близко к единице ($r > 0,8$), то полученную зависимость можно считать линейной, т.е. искомое уравнение регрессии можно считать уравнением прямой [65]. Погрешность расчетов определяется степенью совпадения рассчитанных значений с фактическими.

Для определения коэффициентов регрессии степенной статистической зависимости ($y = ax^b$) в таблицу 2.11 заносятся натуральные логарифмы значений х и у. Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\sum (\ln y_i + \ln x_i)^2 = \sum \ln x_i^2 + 2\sum \ln x_i \ln y_i + \sum \ln y_i^2. \quad (2.10)$$

Таблица 2.11 - Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии степенной зависимости

№	$\ln y_i$	$\ln x_i$	$\ln y_i^2$	$\ln y_i \ln x_i$	$\ln x_i^2$	$\ln y_i + \ln x_i$	$(\ln y_i + \ln x_i)^2$
1	$\ln y_1$	$\ln x_1$	$\ln y_1^2$	$\ln y_1 \ln x_1$	$\ln x_1^2$	$\ln y_1 + \ln x_1$	$(\ln y_1 + \ln x_1)^2$
2	$\ln y_2$	$\ln x_2$	$\ln y_2^2$	$\ln y_2 \ln x_2$	$\ln x_2^2$	$\ln y_2 + \ln x_2$	$(\ln y_2 + \ln x_2)^2$
3	$\ln y_3$	$\ln x_3$	$\ln y_3^2$	$\ln y_3 \ln x_3$	$\ln x_3^2$	$\ln y_3 + \ln x_3$	$(\ln y_3 + \ln x_3)^2$
n	$\ln y_n$	$\ln x_n$	$\ln y_n^2$	$\ln y_n \ln x_n$	$\ln x_n^2$	$\ln y_n + \ln x_n$	$(\ln y_n + \ln x_n)^2$
Σ	$\Sigma \ln y_i$	$\Sigma \ln x_i$	$\Sigma \ln y_i^2$	$\Sigma \ln y_i \ln x_{ii}$	$\Sigma \ln x_i^2$		$\Sigma (\ln y_i + \ln x_i)^2$

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma (\ln y_i + \ln x_i)^2 = \Sigma \ln x_i^2 + 2 \Sigma \ln x_i \ln y_i + \Sigma \ln y_i^2. \quad (2.11)$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \Sigma \ln x_i \ln y_i - \Sigma \ln x_i \Sigma \ln y_i}{n \Sigma \ln x_i^2 - (\Sigma \ln x_i)^2}, \quad (2.12)$$

$$\ln \alpha = \frac{(\Sigma \ln y_i - b \Sigma \ln x_i)}{n}. \quad (2.13)$$

$$a = e^{\ln \alpha} \quad (2.14)$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma \ln x_i^2 - (\Sigma \ln x_i)^2}{n \Sigma \ln y_i^2 - (\Sigma \ln y_i)^2}}. \quad (2.15)$$

Если значение коэффициента корреляции близко к единице ($r > 0,8$), то полученную зависимость можно считать степенной, т.е. искомое уравнение регрессии можно считать уравнением степенной зависимости [65].

Для определения коэффициентов регрессии экспоненциальной статистической зависимости ($y = ae^{bx}$) в таблицу 2.12 заносятся натуральные логарифмы значений y и фактические значения x . Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\Sigma (\ln y_i + x_i)^2 = \Sigma x_i^2 + 2 \Sigma x_i \ln y_i + \Sigma \ln y_i^2. \quad (2.16)$$

Таблица 2.12 - Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии экспоненциальной зависимости

№	$\ln y_i$	x_i	$\ln y_i^2$	$\ln y_i x_i$	x_i^2	$\ln y_i + x_i$	$(\ln y_i + x_i)^2$
1	$\ln y_1$	x_1	$\ln y_1^2$	$\ln y_1 x_1$	x_1^2	$\ln y_1 + x_1$	$(\ln y_1 + x_1)^2$
2	$\ln y_2$	x_2	$\ln y_2^2$	$\ln y_2 x_2$	x_2^2	$\ln y_2 + x_2$	$(\ln y_2 + x_2)^2$
3	$\ln y_3$	x_3	$\ln y_3^2$	$\ln y_3 x_3$	x_3^2	$\ln y_3 + x_3$	$(\ln y_3 + x_3)^2$
n	$\ln y_n$	x_n	$\ln y_n^2$	$\ln y_n x_n$	x_n^2	$\ln y_n + x_n$	$(\ln y_n + x_n)^2$
Σ	$\Sigma \ln y_i$	Σx_i	$\Sigma \ln y_i^2$	$\Sigma \ln y_i x_i$	Σx_i^2		$\Sigma (\ln y_i + x_i)^2$

Точности расчетов проверяется по формуле

$$\Sigma (\ln y_i + x_i)^2 = \Sigma x_i^2 + 2 \Sigma x_i \ln y_i + \Sigma \ln y_i^2. \quad (2.17)$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \Sigma x_i \ln y_i - \Sigma x_i \Sigma \ln y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}, \quad (2.18)$$

$$\ln a = \frac{(\Sigma \ln y_i - b \Sigma x_i)}{n}. \quad (2.19)$$

$$a = e^{\ln a} \quad (2.20)$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}{n \Sigma \ln y_i^2 - (\Sigma \ln y_i)^2}}. \quad (2.21)$$

Если значение коэффициента корреляции близко к единице ($r > 0,8$), то полученную зависимость можно считать экспоненциальной, т.е. искомое уравнение регрессии можно считать уравнением экспоненциальной зависимости [65].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

1. В рамках исследования были рассмотрены различные методы контроля качества поверхностного слоя просверленных отверстий, включая оценку глубины дефектного слоя и упрочнения. Это подчеркивает важность многоуровневого анализа для обеспечения надежности и долговечности.

2. Использование методов статистического анализа, таких как корреляционно-регрессионный анализ и определение законов распределения случайных величин, позволяет более точно интерпретировать экспериментальные данные. Сочетание различных методов корреляционного и регрессионного анализа придает возможность выявления взаимосвязи между параметрами процесса и качеством поверхности, что в свою очередь может привести к повышению эффективности технологических процессов.

3. Разработана методология планирования и организации экспериментов, включающая в себя:

- выбор станка, подготовку технологических и измерительных баз обрабатываемой заготовки;
- двухплоскостную заточку режущей части сверл;
- методики контроля глубины дефектного поверхностного слоя исключая разрезку заготовки на микрошлифы и контроля твердости поверхности, позволяющую проводить многократные измерения по всей глубине просверленных отверстий и обеспечивающих высокое качество результатов экспериментов;
- обработку экспериментальных данных методами математической статистики и корреляционно-регрессионного анализа, способствующих получению зависимостей и разработке эмпирических моделей с высокой степенью адекватности.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ОТВЕРСТИЙ

Одним из показателей качества поверхностного слоя отверстий является глубина дефектного поверхностного слоя, которая является нормированной величиной и при нормальном развертывании регламентируется в пределах 0,025 – 0,015 мм (табл.3.1) [51].

Показатели качества поверхности при обработке отверстий малых диаметров различными методами обработки мерными осевыми инструментами, рекомендуемыми справочной литературой [51], представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Показатели качества при обработке отверстий мерными осевыми инструментами

Метод обработки	Шероховатость поверхности R_a , мкм	Глубина дефектного поверхностного слоя,	Квалитет точности	Технологические допуски (мкм) на размер при номинальных диаметрах отверстий Св. 10 до 18 мм
Сверление, рассверливание	25 - 0,8	70 - 15	13 - 9	270 - 43
Зенкерование черновое	25 – 6,3	50 - 20	13- 12	270 - 180
Зенкерование чистовое	25 – 0,4	25 - 15	13 - 8	270 - 27
Развертывание нормальное	12,5 – 0,8	25 - 15	11- 10	110 - 70
Развертывание точное	6,3 – 0,4	15 - 5	9 - 7	43 - 18
Развертывание тонкое	3,2 – 0,1	10 - 5	6	11

Анализ данных таблицы 3.1 свидетельствует о возможности получения сверлением отверстий с показателями качества, которые обеспечиваются при

нормальном развертывании, в том числе обеспечить глубину дефектного поверхностного слоя в пределах 15 мкм. Такие потенциальные возможности сверления в части обеспечения показателей качества обрабатываемого отверстия позволяют существенно сократить трудоемкость обработки за счет избежания таких промежуточных технологических операций, как рассверливание, зенкерование и нормальное развертывание. Обзор и анализ научно-технической литературы в части сверления деталей из конструкционных углеродистых сталей показал отсутствие информации о влиянии режимов резания (скорость резания, подача) и геометрии сверла (углы заточки, форма режущей кромки) на глубину дефектного поверхностного слоя.

3.1. Характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя

На кафедре Технологии машиностроения КГТУ им. И. Раззакова проведены исследования влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя отверстий при сверлении конструкционной стали Ст45 [56, 57, 66, 73]. На рисунке 3.1 представлена микроструктура поверхностного слоя отверстия.

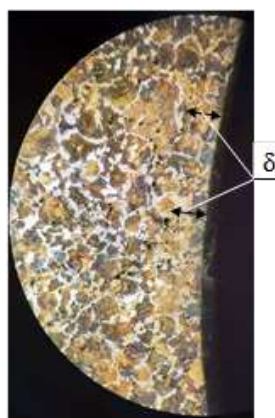


Рисунок 3.1 - Фотография микроструктуры поверхностного слоя отверстия, где δ - глубина дефектного поверхностного слоя отверстий.

Результаты анализа микроструктуры поверхностного слоя отверстий при сверлении сверлами нормальной точности класса В [58, 59, 60] представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Глубина дефектного поверхностного слоя δ при сверлении сверлами нормальной точности класса В

S , мм/об V , м/мин	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	δ , мкм					
2,18					66,66	49,66
2,76				58,33	56,66	55,66
3,45			51,66	56,66	53,33	50,00
4,32		53,33	53,33	63,33	63,33	46,66
5,53	50,00	43,33	53,33	50,00	58,33	53,33

В таблице 3.2 приведены средние значения глубины дефектного слоя δ , полученные в результате статистической обработки результатов измерений. Определение средних значений глубины дефектного слоя δ посредством статистической обработки результатов измерений глубины дефектного слоя δ в соответствии с принятой схемой измерения (рисунок 2.14) при скорости резания $V = 5,53$ м/мин представлено в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Результаты измерений глубины дефектного слоя δ при сверлении сверлами нормальной точности класса В, $V = 5,53$ м/мин

Точки измерения	S , мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25
	Δ					
1	50,00	40,00	55,00	50,00	60,00	50,00
2	50,00	40,00	55,00	50,00	60,00	50,00
3	50,00	50,00	50,00	50,00	55,00	60,00
$\delta_{ср.}$	50,00	43,33	53,33	50,00	58,33	53,33

Результаты анализа микроструктуры поверхностного слоя отверстий при сверлении, приведенных в таблице 3.2 не дают однозначного ответа на вопрос о наличии и значимости связи между параметрами режимов резания и глубиной

дефектного поверхностного слоя отверстий. Такой ответ можно получить при применении методов статистического анализа результатов измерений, а именно корреляционного анализа. Первым шагом корреляционного анализа является выявление закономерности распределения результатов измерений [78,85].

Проверка гипотезы о принадлежности результатов измерений глубины дефектного поверхностного слоя нормальному распределению проводилось в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 8.736-2011[55]. В нашем случае выборка результатов измерений менее пятидесяти. Для аналогичных размеров выборки в соответствии с данным стандартом проверка гипотезы о принадлежности результатов измерений глубины дефектного поверхностного слоя нормальному распределению проводится с применением двух критериев. Для подтверждения соответствия результатов измерений закону Гаусса необходимо чтобы оба критерия выполнялись, в ином случае результаты измерений не могут быть признаны соответствующими нормальному распределению.

Первый критерий $\bar{d}$, вычисленный на основании зависимостей (2.2) и (2.3) лежит в пределах квантилей распределения для выбранного уровня значимости, т.е. $0,7304 \leq 0,7914 \leq 0,8768$ (табл. 2.5), что означает соответствие результатов измерений нормальному распределению.

В соответствии со вторым критерием результаты измерений можно считать принадлежащими нормальному распределению, если не более одной разности $|\delta_i - \bar{\delta}|$ превзошли значение $Z_{p/2} \times S$.

В нашем случае $Z_{p/2} = 2,33$ (табл. 2.7), $S = 5,75$, $Z_{p/2} \times S = 13,3975$

Наибольшее значение разности $|\delta_i - \bar{\delta}|$ равно 12,4.

Таким образом, ни одно значение $|\delta_i - \bar{\delta}|$ не превзошло $Z_{p/2} \times S = 13,3975$ и, следовательно, можно считать, что результаты измерений глубины дефектного поверхностного слоя соответствуют нормальному распределению.

На основании структуры таблицы 2.8 и данных результатов измерений глубины дефектного поверхностного слоя (табл. 3.2) сформированы данные для оценки значимости связи между коррелируемыми параметрами (V и δ) (табл. 3.3, табл. 3.4 и табл. 3.5).

Таблица 3.3 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя при подаче $S = 0,25$ мм/об

№	δ_i	v_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(V - \bar{V})$	$(V - \bar{V})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(V_i - \bar{V})$
1	49,66	2,18	-1,42	2,0164	-1,468	2,1550	2,08456
2	55,66	2,76	4,58	20,9764	-0,888	0,7885	-4,06704
3	50,00	3,45	-1,02	1,0404	-0,198	0,0392	0,20196
4	46,66	4,32	-4,32	18,6624	0,672	0,4516	-2,90304
5	53,33	5,53	2,18	4,7524	1,882	3,5419	4,10276
Σ				47,448	6,97628		-0,5808

На основании обобщенной формулы (2.5) формула определения коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя будет иметь вид

$$r = \frac{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})(V_i - \bar{V})}{\sqrt{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})^2 \Sigma(V_i - \bar{V})^2}}. \quad (3.1)$$

На основании данных таблицы 3.3 и формулы (3.1) имеем:

$$r = \frac{-0,5808}{17,913} = -0,0324.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = -0,0324$ с данными таблицы 2.12, где представлены критические значения коэффициента

корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.4 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя при подаче $S=0,2$ мм/об

№	δ_i	v_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(V_i - \bar{V})$	$(V_i - \bar{V})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(V_i - \bar{V})$
1	66,66	2,18	7,06	49,8436	-1,468	2,1550	-10,36408
2	56,66	2,76	-2,94	8,6436	-0,888	0,7885	2,61072
3	53,33	3,45	-6,34	40,1956	-0,198	0,0392	1,25532
4	63,33	4,32	3,56	12,6736	0,672	0,4516	2,39232
5	58,33	5,53	-1,34	1,7956	1,882	3,5419	-2,52188
Σ				114,9476		6,97628	-6,6276

Используя ту же формулу (3.1) и данные таблицы 3.4 получим

$$r = \frac{-6,6276}{28,318} = -0,234.$$

И этот коэффициент также отрицательный, указывающий на обратную связь между исследуемыми параметрами, по величине не значим в значительной степени (см. табл. 2.12).

Таблица 3.5 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя при подаче $S=0,16$ мм/об

№	δ_i	v_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(V_i - \bar{V})$	$(V_i - \bar{V})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(V_i - \bar{V})$
1	58,33	2,76	1,2	1,44	-1,255	1,575025	-1,506
2	56,66	3,45	-0,4	0,16	-0,565	0,319225	0,226
3	63,33	4,32	6,2	38,44	0,305	0,093025	1,891
4	50,00	5,53	-7,0	49	1,515	2,295225	-10,605
Σ				89,04		4,2825	-9,994

Формула (3.1) и данные таблицы 3.5 позволяют рассчитать значимость связи со скоростью на подаче 0,16 мм/об.

$$r = \frac{-9,994}{19,527} = -0,512.$$

Сравнивая полученное значение коэффициента $r = -0,512$ с данными таблицы 2.12, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

На основании структуры таблицы 2.8 и данных результатов измерений глубины дефектного поверхностного слоя (табл. 3.2) получены исходные данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скоростях $V = 5,53$ м/мин, $V = 4,32$ м/мин и $V = 3,45$ м/мин, которые представлены в таблицах 3.6, 3.7 и 3.8

Таблица 3.6 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скорости резания $V = 5,53$ м/мин

№	δ_i	S_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(S_i - \bar{S})$
1	50,0	0,078	-1,35	1,8225	-0,075	0,005625	0,10125
2	43,3	0,1	-8,05	64,8025	-0,053	0,002809	0,42665
3	53,2	0,13	1,85	3,4225	-0,023	0,000529	-0,04255
4	50,1	0,16	-1,25	1,5625	0,007	0,000049	-0,00875
5	58,3	0,20	6,95	48,3025	0,047	0,002209	0,32665
6	53,2	0,25	1,85	3,4225	0,097	0,009409	0,17945
Σ				123,335		0,02063	0,9827

Формула расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя, полученная на основе зависимости (2.5) будет иметь вид

$$r = \frac{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})^2 \Sigma(S_i - \bar{S})^2}}. \quad (3.2)$$

Данные таблицы 3.6 по формуле (3.2) позволяет определить значимость связи между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скорости 5,53 м/мин:

$$r = \frac{0,9827}{1,595} = 0,616.$$

Сравнивая полученное значение коэффициента $r = 0,616$ с данными таблицы 2.12, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.7 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного слоя на скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	δ_i	S_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(S_i - \bar{S})$
1	53,1	0,1	-2,8	7,84	-0,068	0,004624	0,1904
2	53,2	0,13	-2,7	7,29	-0,038	0,001444	0,1026
3	63,3	0,16	7,4	54,76	-0,008	0,000064	-0,0592
4	63,2	0,20	7,3	53,39	0,032	0,001024	0,2336
5	46,7	0,25	-9,2	84,64	0,082	0,006724	-0,7544
Σ				207,82		0,01388	-0,287

По формуле (3.2) и данных таблицы 3.7 определяем значимость связи между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скорости 4,32 м/мин.

$$r = \frac{-0,287}{1,6985} = -0,168.$$

Как видно, на скорости 4,32 м/мин коэффициент отрицательный, указывающий на обратную связь, и, как во всех предыдущих случаях, он не значим (см. табл. 2.12).

Таблица 3.8 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скорости резания $V = 3,45$ м/мин

№	δ_i	S_i	$(\delta_i - \bar{\delta})$	$(\delta_i - \bar{\delta})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\delta_i - \bar{\delta})(S_i - \bar{S})$
1	51,5	0,13	-1,375	1,890625	-0,055	0,003025	0,075625
2	56,7	0,16	3,825	14,630625	-0,025	0,000625	-0,095625
3	53,3	0,20	0,475	0,225625	0,015	0,000225	0,007125
4	50,0	0,25	-2,825	7,980625	0,065	0,004225	-0,183625
Σ	52,875	0,185		24,7275		0,0081	-0,1965

Используя данные табл. 3.8 по формуле (3.2) рассчитываем коэффициент корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя на скорости 3,45 м/мин:

$$r = \frac{-0,1965}{0,3095} = -0,439.$$

Данный коэффициент также отрицательный, указывает на обратную связь между исследуемыми параметрами, по величине в существенной степени не значим (см. табл. 2.12).

Итоги оценки значимости связи между подачей, скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, имевших большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм, показывают (см. табл. 3.9) на отсутствие значимой связи между подачей, скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм [Таблица XII, 65].

Таблица 3.9 - Корреляция между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В

S, мм/об	связь V- δ		V, м/мин	связь S- δ	
	r			r	
0,16	-0,512	не значима	3,45	-0,439	не значима
0,2	-0,234	не значима	4,32	-0,168	не значима
0,25	-0,032	не значима	5,53	0,616	не значима

Аналогичным образом проведен корреляционный анализ результатов исследований, представленных в таблице 3.10.

В таблице 3.10 приведены средние значения поверхностных дефектов отверстий, просверленных сверлами класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм [78].

Таблица 3.10 - Глубина дефектного поверхностного слоя δ при сверлении сверлами повышенной точности класса А1

S, мм/об V, м/мин	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	δ , мкм					
2,18					25,0	25,0
2,76				22,30	23,0	22,30
3,45			16,00	21,30	21,00	22,60
4,32		15,30	18,60	19,00	19,7	21,00
5,53	13,33	15,00	18,00	18,67	19,00	19,33

Определение средних значений глубины дефектного слоя δ посредством статистической обработки результатов измерений глубины дефектного слоя δ в соответствии с принятой схемой измерения (рисунок 2.14) при скорости резания $V = 5,53$ м/мин представлено в таблице 3.10.1.

Таблица 3.10.1 – Результаты измерений глубины дефектного поверхностного слоя δ при сверлении сверлами повышенной точности класса А1, $V = 5,53$ м/мин

Точки измерения	S , мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25
	δ					
1	20,00	17,00	17,00	18,00	20,00	20,00
2	10,00	13,00	17,00	17,00	18,00	19,00
3	10,00	15,00	20,00	21,00	19,00	19,00
$\delta_{\text{ср.}}$	13,33	15,00	18,00	18,67	19,00	19,33

Как видно из таблицы 3.10 скорость резания и подача влияют на глубину дефектного поверхностного слоя δ отверстий.

Результаты оценки корреляции между подачей, скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя δ отверстий, просверленных сверлами класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм, проведенной по аналогичной методике, примененной для случая обработки отверстий сверлами нормальной точности В, представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Корреляция между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части

S, мм/об	связь V - δ		V, м/мин	связь S - δ	
	r			r	
0,16	-0,944	значима	3,45	0,8215	не значима
0,2	-0,949	значима	4,32	0,890	значима
0,25	-0,946	значима	5,53	0,876	значима

Представленные в данной таблице сведения показывают, что при работе сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, имеющих осевое биение режущих кромок не более 0,06 мм, имеет место наличие значимой связи между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий при всех исследуемых подачах. А между подачей

и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий наблюдается значимая связь на всех скоростях резания, за исключением скорости $V = 3,45$ м/мин, где такой связи не наблюдается. [Таблица XII, 65].

Зависимости глубины дефектного поверхностного слоя от параметров режима резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 представлены на рисунках 3.2 и 3.3.

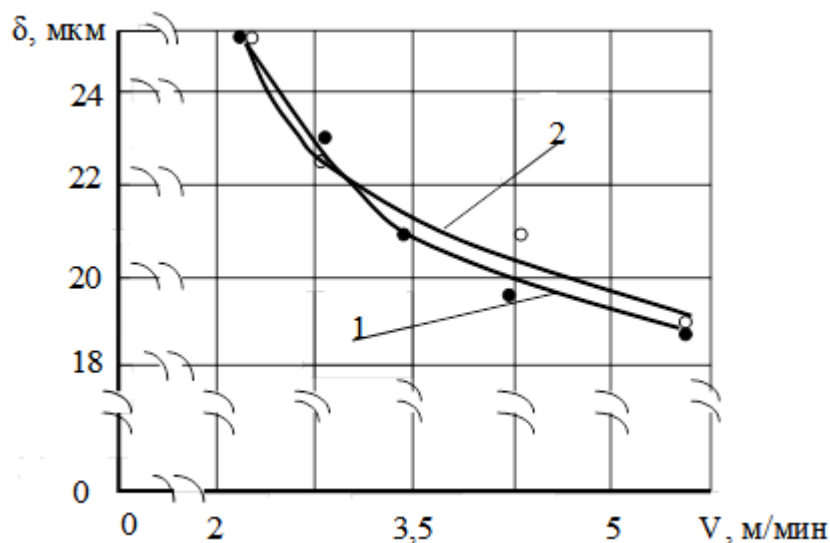


Рисунок 3.2 - Зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1: 1 – подача $S = 0,2$ мм/об, 2 – $S = 0,25$ мм/об.

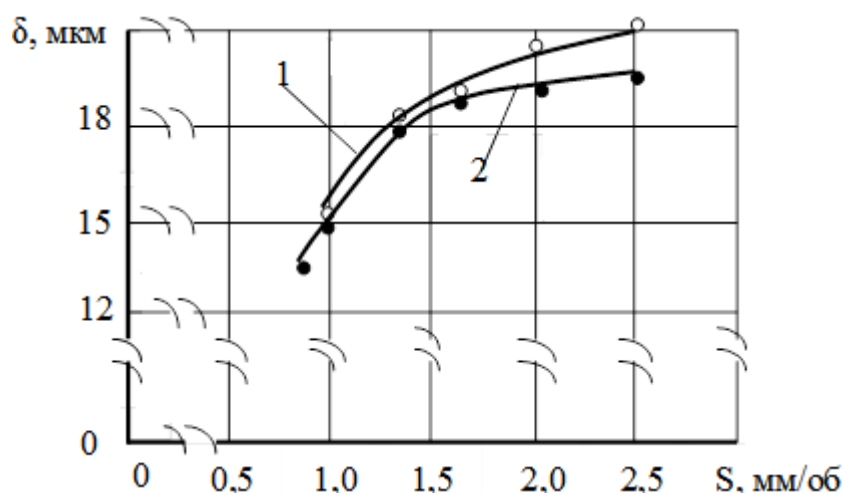


Рисунок 3.3 - Зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от подачи при сверлении сверлами повышенной точности класса А1, 1 - $V = 4,32$ м/мин, 2 - $V = 5,53$ м/мин.

На представленных рисунках наблюдается уменьшение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий с увеличением скорости резания (рисунок 3.2) и увеличение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий с увеличением подачи (рисунок 3.3). В работах [62, 84] показано, что разбивка отверстий с увеличением скорости резания увеличивается, что способствует уменьшению величины контакта ленточек со стенками обрабатываемого отверстия и соответствующим уменьшением величины крутящего момента от трения ленточек. Этим можно объяснить уменьшение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий с увеличением скорости резания (рисунок 3.2). Глубина дефектного поверхностного слоя возрастает с увеличением подачи (рисунок 3.3), так как силы резания в основном зависят от подачи [63].

На основании результатов исследований, представленных в таблице 3.10, можно сделать вывод о том, что при работе сверлами класса А1, имеющими двухплоскостную заточку, на всех исследуемых скоростях резания и подачах глубина дефектов находится в пределах 25 мкм, как после нормального развертывания [51, 57]. Это, в свою очередь, позволяет делать вывод о возможности значительного снижения трудоемкости обработки деталей с отверстиями высокой точности путем исключения из технологического процесса их обработки последующих технологических операций: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное развертывание.

3.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от параметров режима резания

Кривые графиков рисунок 3.2 и рисунок 3.3 являются статистическими зависимостями, полученными усреднением нескольких измерений в каждой точке, поэтому аппроксимация этих зависимостей проводилась методом наименьших квадратов. Определялись коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей: прямой, степенной и экспоненциальной. Затем

рассчитывался коэффициент корреляции каждой из них, и методом сравнительного анализа определялась зависимость наиболее адекватная результатам исследований.

3.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.12 линейной зависимости

Таблица 3.12 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	δ_i	S_i	δ_i^2	S_i^2	$\delta_i S_i$	$\delta_i + S_i$	$(\delta_i + S_i)^2$
1	15,30	0,1	234,09	0,01	1,53	15,4	237,16
2	18,60	0,13	345,96	0,0169	2,418	18,73	350,8129
3	19,00	0,16	361	0,0256	3,04	19,16	367,1056
4	19,7	0,20	386,5156	0,04	3,932	16,86	284,2596
5	21,00	0,25	441	0,0625	5,25	21,25	251,5625
Σ	93,56	0,84	1770,5612	0,155	16,17		1690,9006

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\begin{aligned} \Sigma(\delta_i + S_i)^2 &= \Sigma S_i^2 + 2\Sigma \delta_i S_i + \Sigma \delta_i^2 = \\ &= 0,155 + 31,14 + 1659,6056 = 1690,9006 \end{aligned}$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам [57]:

$$b = \frac{n\Sigma S_i \delta_i - \Sigma S_i \Sigma \delta_i}{n\Sigma S_i^2 - (\Sigma S_i)^2} = \frac{5 \cdot 16,17 - 0,84 \cdot 93,56}{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2} = 32,56$$

$$\alpha = \frac{\Sigma \delta_i - b \Sigma S_i}{n} = \frac{(93,56 - 32,56 \cdot 0,84)}{5} = 13,24$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\delta = 13,24 + 32,56S.$$

Проверка линейности полученной зависимости осуществляется посредством расчета коэффициента корреляции по формуле [57]:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum s_i^2 - (\sum s_i)^2}{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}} = 32,56 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2}{5 \cdot 1770,5612 - (93,56)^2}} = 0,86$$

Степенная зависимость

Заполняется таблица 3.13.

Таблица 3.13 – Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	$\ln \delta_i$	$\ln S_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$(\ln S_i)^2$	$\ln \delta_i \ln S_i$	$\ln \delta_i + \ln S_i$	$(\ln \delta_i + \ln S_i)^2$
1	2,73	-2,3	7,4529	2,29	-6,279	0,43	0,1849
2	2,92	-2,04	8,5264	4,1616	-5,9568	0,88	0,7644
3	2,944	-1,83	8,964036	3,3489	-5,38752	1,114	1,240996
4	2,9786	-1,61	8,87205796	2,5921	-4,795546	1,17	1,3689
5	3,0445	-1,386	9,26898025	1,920996	-4,219677	1,6585	2,75062225
Σ	14,6171	-9,166	42,78746421	17,313596	-26,638543		6,31981825

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \delta_i + \ln S_i)^2 = \Sigma(\ln S_i)^2 + 2 \Sigma \ln \delta_i \ln S_i + \Sigma(\ln \delta_i)^2 = 17,313596 - 2 \cdot 26,638543 + 42,78746421 = 6,31981825$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln S_i \ln \delta_i - \Sigma \ln S_i \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma \ln S_i^2 - (\Sigma \ln S_i)^2} = \frac{-5 \cdot 26,638543 + 9,166 \cdot 14,6171}{5 \cdot 17,313596 - (-9,166)^2} = 0,3086$$

$$\ln a = \frac{\Sigma \ln \delta_i - b \Sigma \ln S_i}{n} = \frac{14,6171 + 0,3086 \cdot 9,166}{5} = 3,489, \quad a = 32,7532.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\delta = 32,7532 \cdot S^{0,3086}$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \ln S_i^2 - (\sum \ln S_i)^2}{n \sum \ln \delta_i^2 - (\sum \ln \delta_i)^2}} = 0,3086 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 17,313596 - (-9,166)^2}{5 \cdot 42,78746421 - (14,6171)^2}} = 0,936.$$

Экспоненциальная зависимость

Заполняется таблица 3.14.

Таблица 3.14 – Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	$\ln \delta_i$	S_i	$(\ln \delta_i)^2$	S_i^2	$\ln \delta_i S_i$	$\ln \delta_i + S_i$	$(\ln \delta_i + S_i)^2$
1	2,73	0,1	7,4529	0,01	0,273	2,83	8,0089
2	2,92	0,13	8,5264	0,0169	0,3796	3,05	9,3025
3	2,944	0,16	8,964036	0,0256	0,47104	3,104	9,634816
4	2,9786	0,20	8,87205796	0,04	0,59572	2,98	8,8804
5	3,0445	0,25	9,26898025	0,0625	0,761125	3,2945	10,85373025
Σ	14,6171	0,84	42,78747421	0,155	2,480485		46,68034625

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma (\ln \delta + S_i)^2 = \Sigma S_i^2 + 2 \Sigma S_i \ln \delta_i + \Sigma \ln \delta_i^2 = 0,155 + 2 \cdot 2,440765 + 41,64381625 = 46,68034625$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma S \ln \delta_i - \Sigma S_i \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma S_i^2 - (\Sigma S)^2} = \frac{5 \cdot 2,480485 - 0,84 \cdot 14,6171}{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2} = 1,7876,$$

$$\ln a = \frac{\Sigma \ln \delta_i - b \Sigma S_i}{n} = \frac{14,6171 - 1,7876 \cdot 0,84}{5} = 2,6231, \quad a = 13,778.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\delta = 13,778 \cdot e^{1,7876S}$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum S_i^2 - (\sum S_i)^2}{n \sum \ln \delta_i^2 - (\sum \ln \delta_i)^2}} = 1,7876 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2}{5 \cdot 42,78747421 - (14,6171)^2}} = 0,89.$$

3.2.2 Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.15.

Таблица 3.15 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	δ_i	V_i	δ_i^2	V_i^2	$\delta_i V_i$	$\delta_i + V_i$	$(\delta_i + V_i)^2$
1	25,00	2,18	625	4,7524	54,5	27,18	738,7524
2	23,0	2,76	529	7,6176	63,48	25,76	663,5776
3	21,00	3,45	441	11,9025	72,45	24,45	597,8025
4	19,7	4,32	386,5156	18,6624	84,9312	20,98	440,1604
5	18,9	5,53	358,3449	30,5809	104,6829	24,46	598,2916
Σ	107,59	18,24	2339,8605	73,5158	380,0441	122,86	3038,4845

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum (\delta_i + V_i)^2 = \sum V_i^2 + 2 \sum V_i \delta_i + \sum \delta_i^2 = 73,5158 + 2 \cdot 367,0841 + 2230,9005 = 3038,4845.$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$b = \frac{n \sum V_i \delta_i - \sum V_i \sum \delta_i}{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2} = \frac{5 \cdot 380,0441 - 18,24 \cdot 107,59}{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2} = -1,7838,$$

$$\alpha = \frac{\sum \delta_i - b \sum V_i}{n} = \frac{\sum 107,59 + 1,7838 \cdot 18,24}{5} = 28,0253.$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$\delta = 28,0253 - 1,7838V$$

Проверка линейности полученной зависимости осуществляется посредством расчета коэффициента корреляции по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n \sum \delta_i^2 - (\sum \delta_i)^2}} = 1,7838 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2}{5 \cdot 2339,8605 - (107,59)^2}} = 0,95.$$

Степенная зависимость

Заполняется таблица 3.16

Таблица 3.16 - Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	$\ln \delta_i$	$\ln V_i$	$(\ln \delta_i)^2$	$(\ln V_i)^2$	$\ln \delta_i \ln V_i$	$\ln \delta_i + \ln V_i$	$(\ln \delta_i + \ln V_i)^2$
1	3,219	0,779	10,361961	0,606841	2,507601	3,998	15,984004
2	3,135	1,015	9,828225	1,030225	3,182025	4,15	17,2225
3	3,044	1,238	9,265936	1,532644	3,768472	4,282	18,335524
4	2,9786	1,643	8,87205796	2,699449	4,8938398	4,456	19,855936
5	2,941	1,71	8,649481	2,9241	5,02911	4,651	21,631801
Σ	15,3176	6,385	46,97766096	8,793259	19,3810478		93,029765

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\Sigma(\ln \delta_i + \ln V_i)^2 = \Sigma(\ln V_i)^2 + 2 \Sigma \ln V_i \ln \delta_i + \Sigma(\ln \delta_i)^2 = 8,793259 + 2 \cdot 19,3810478 + 46,018572 = 93,029765.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma \ln V_i \ln \delta_i - \Sigma \ln V_i \Sigma \ln \delta_i}{n \Sigma \ln V_i^2 - (\Sigma \ln V_i)^2} = \frac{5 \cdot 19,3810478 - 6,385 \cdot 15,3176}{5 \cdot 8,793259 - (6,385)^2} = -0,3081,$$

$$\ln a = \frac{\Sigma \ln \delta_i - b \Sigma \ln V_i}{n} = \frac{15,3176 + 0,3081 \cdot 6,385}{5} = 3,5093, \quad a = 31,3761.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$\delta = 31,3761 V^{-0,3081}$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \ln V_i^2 - (\sum \ln V_i)^2}{n \sum \ln \delta_i^2 - (\sum \ln \delta_i)^2}} = 0,3081 \sqrt{\frac{5 \cdot 8,793259 - (6,385)^2}{5 \cdot 46,97766096 - (15,3176)^2}} = 0,99.$$

Экспоненциальная зависимость

Заполняется таблица 3.17

Таблица 3.17 - Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	$\ln \delta_i$	V_i	$(\ln \delta_i)^2$	V_i^2	$\ln \delta_i V_i$	$\ln \delta_i + V_i$	$(\ln \delta_i + V_i)^2$
1	3,219	2,18	10,361961	4,7524	7,01742	5,399	29,149201
2	3,135	2,76	9,828225	7,6176	8,6526	5,895	34,751025
3	3,044	3,45	9,265936	11,9025	10,5018	6,494	42,172036
4	2,813	4,32	7,912969	18,6624	12,867552	7,133	50,879689
5	2,941	5,53	8,649481	30,5809	16,26373	8,471	71,757841
Σ	15,3176	18,24	46,97766096	73,5158	55,303102		228,709792

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum (\ln \delta_i + V_i)^2 = \sum V_i^2 + 2 \sum V_i \ln \delta_i + \sum \ln \delta_i^2 = 73,5158 + 2 \cdot 54,58771 + 46,018572 = 228,709792.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости определяется по формулам:

$$b = \frac{n \sum V \ln \delta_i - \sum V_i \sum \ln \delta_i}{n \sum V_i^2 - (\sum V)^2} = \frac{5 \cdot 55,303102 - 18,24 \cdot 15,3176}{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2} = -0,0825,$$

$$\ln a = \frac{\sum \ln \delta_i - b \sum V_i}{n} = \frac{15,3176 + 0,0825 \cdot 18,24}{5} = 3,387904, a = 28,966.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$\delta = 28,966 \cdot e^{-0,0825V}.$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n \sum \ln \delta_i^2 - (\sum \ln \delta_i)^2}} = 0,0825 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2}{5 \cdot 46,97766096 - (15,3176)^2}} = 0,95.$$

Аналогично определяются коэффициенты регрессии статистических зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи на скорости резания 5,53 м/мин и глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания на подаче 0,25 мм/об. Результаты аппроксимации графических зависимостей, представленных на рисунке 3.2 и рисунке 3.3 представлены в таблице 3.18 и таблице 3.19.

Таблица 3.18 - Результаты аппроксимации зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи

№ п/п	На скорости резания $V = 4,32$ м/мин	r	№ п/п	На скорости резания $V = 5,53$ м/мин	r
1	$\delta = 13,24 + 32,56S$	0,86	4	$\delta = 12,3 + 31,73S$	0,85
2	$\delta = 32,7532S^{0,3086}$	0,94	5	$\delta = 31,36S^{0,3134}$	0,92
3	$\delta = 13,778e^{1,7876S}$	0,89	6	$\delta = 12,647e^{1,935S}$	0,84

Таблица 3.19 - Результаты аппроксимации зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания

№ п/п	На подаче $S = 0,2$ мм/об	r	№ п/п	На подаче $S = 0,25$ мм/об	r
1	$\delta = 28,025 - 1,784V$	0,95	4	$\delta = 27,78 - 1,59V$	0,95
2	$\delta = 31,3761V^{-0,3081}$	0,99	5	$\delta = 29,4677V^{-0,233}$	0,92
3	$\delta = 28,966e^{-0,0825V}$	0,95	6	$\delta = 28,62e^{-0,0735V}$	0,96

3.3. Построение эмпирической модели зависимости глубины дефектного поверхностного слоя отверстий от параметров режима резания

Аппроксимация графических зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи и скорости резания, представленных на рисунке 3.2 и рисунке 3.3, позволила определить коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей для сочетания скоростей резания и подач, показанных в таблице 3.24 и таблице 3.25. Сравнительный анализ коэффициентов корреляции показал, что наиболее адекватными результатам исследований являются степенные зависимости №2 таблице 3.24 ($r = 0,94$) и №3 таблице 3.25 ($r = 0,99$), которые следует использовать для получения обобщенной эмпирической зависимости.

Указанные зависимости имеют вид

$$\delta = 32,7532S^{0,3086}, \quad (3.1)$$

$$\delta = 31,3761V^{-0,3081}. \quad (3.2)$$

В таблице 3.20 представлены результаты сравнительного анализа адекватности экспериментальным данным зависимости (3.1)

Таблица 3.20 - Адекватность зависимости (3.1) результатам настоящих исследований

V, м/мин	S = 0,2 мм/об			S = 0,25 мм/об		
	$\delta_{\text{факт.}}$, мкм	$\delta_{\text{расч.}}$, мкм	погр., %	$\delta_{\text{факт.}}$, мкм	$\delta_{\text{расч.}}$, мкм	погр., %
3,45	21,00	19,93	5,1	22,6	21,35	5,5
4,32	19,7	19,93	1,4	21,0	21,35	1,7
5,53	18,9	19,93	5,2	19,4	21,35	9,8
			ср. 3,9			ср. 4,3

В таблице 3.21 представлены результаты сравнительного анализа адекватности экспериментальным данным зависимости (3.2).

Таблица 3.21 - Адекватность зависимости (3.2) результатам настоящих исследований

V, м/мин	S = 0,2 мм/об			S = 0,25 мм/об		
	δ факт., мкм	δ расч., мкм	погр., %	δ факт., мкм	δ расч., мкм	погр., %
3,45	21,00	21,42	2,0	22,6	21,42	5,2
4,32	19,7	19,99	1,7	21,0	19,99	4,8
5,53	18,9	18,56	1,95	19,4	18,56	4,3
			ср. 1,9			ср. 4,8

Из данных таблицы 3.20 и таблицы 3.21 следует, что средняя погрешность расчетов во всех случаях не превысила значения 5%.

3.3.1. Методика разработки обобщенной эмпирической модели

Методика разработки обобщенной эмпирической зависимости заключается в определении постоянного коэффициента a зависимости (3.3) с использованием результатов испытаний, представленных в таблице 3.10 следующим образом (3.4)

$$\delta = aV^{-0,3081}S^{0,3086}, \quad (3.3)$$

$$a_i = \frac{\delta_i}{V^{-0,3081}S^{0,3086}}. \quad (3.4)$$

Постоянный коэффициент a определяется посредством зависимости (3.5)

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n}. \quad (3.5)$$

На основании данной методики получена эмпирическая модель расчета глубины дефектного слоя просверленных отверстий при варьировании скорости резания и подачи в виде

$$\delta = 51,09V^{-0,3081}S^{0,3086} \quad (3.6)$$

Сравнительный анализ адекватности эмпирической модели (3.6) результатам настоящих исследований (табл. 3.22) проведен посредством сопоставления фактических и рассчитанных значений глубины дефектного поверхностного слоя отверстий и определения расхождения этих значений.

Таблица 3.22 - Адекватность эмпирической модели (3.6) результатам настоящих исследований

V, м/мин	S = 0,2 мм/об			S = 0,25 мм/об		
	δ факт., мкм	δ расч., мкм	погр., %	δ факт., мкм	δ расч., мкм	погр., %
3,45	21,00	21,23	1,09	22,6	22,74	0,62
4,32	19,7	19,8	0,51	21,0	21,22	1,04
5,53	18,9	18,36	2,8	19,4	19,66	4,3
			ср.1,9			ср. 1,3

Из таблицы 3.22 видно, что среднее расхождение фактических и расчетных значений, полученных по эмпирической модели (3.6), не превышает 1,9%, при максимальном значении расхождения 4,3%, что для эмпирической модели, полученной методами математической статистики, является достаточно высокой точностью.

Высокая точность эмпирической модели (3.6) позволяет прогнозировать глубину дефектного поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением. Применение эмпирической модели (3.6) показывает, что при скорости резания 5,53 м/мин и подаче 0,1 мм/об расчетная глубина дефектного поверхностного слоя отверстий составляет 14,9 мкм, что соответствует экспериментальным данным (табл. 3.10) и не превышает минимальную глубину дефектного поверхностного слоя при нормальном развертывании [51]. Это позволяет исключить из технологического процесса их обработки технологические операции рассверливания, чернового и чистового зенкерования, нормального

развертывания, что способствует существенному уменьшению трудоемкость обработки отверстий высокой точности [57, 84].

3.4. Упрочнение поверхностного слоя отверстий

Одним из показателей качества поверхностного слоя отверстий являются остаточные напряжения в поверхностном слое [51]. Остаточные напряжения, возникающие в результате упрочнения поверхностного слоя, повышают твердость и износостойкость поверхностного слоя отверстий. Анализ методов упрочнения поверхностного слоя, представленный во второй главе, показал отсутствие технологических методов упрочнения поверхностного слоя отверстий относительно небольшого диаметра. Поэтому в настоящей работе проведены исследования влияния условий обработки сверлением на твердость поверхностного слоя просверленных отверстий. Одним из показателей прочности поверхностного слоя является твердость обработанной поверхности. В таблице 3.23 приведены результаты анализа твердости поверхности отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, имеющих осевое биение режущих кромок 0,3 мм [64]. Собственная твердость заготовок *HRC* 8.

Таблица 3.23 – Твердость поверхности отверстий, просверленных сверлами нормальной точности класса В

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	<i>HRC</i>					
2,18					11,5	11,7
2,76				12	12,3	10,6
3,45			14,8	11,4	12,7	13,0
4,32		19,3	20,3	17,3	19,2	16,6
5,53	12,6	12,5	12,0	16,0	13,4	12,8

В таблице 3.23 приведены средние значения твердости поверхности просверленных отверстий, полученные в результате статистической обработки результатов измерений. Определение средних значений твердости посредством статистической обработки результатов измерений твердости в соответствии с принятой схемой измерения (рисунок 2.20) при скорости резания $V=5,53$ м/мин представлено в таблице 3.23.1.

Таблица 3.23.1 – Результаты измерений твердости поверхности отверстий при сверлении сверлами нормальной точности класса *B*, $V = 5,53$ м/мин

Точки измерения	<i>S</i> , мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25
	<i>HRC</i>					
1	12,8	12,4	11,7	15,3	11,7	11,9
2	11,9	11,5	11,6	15,5	11,3	11,4
3	12,5	12,7	12,1	15,5	14,3	13,6
4	13,1	13,4	12,6	17,4	15,6	14,2
5	12,7	12,5	12,0	16,3	13,9	13,1
<i>HRC</i> ср.	12,6	12,5	12,0	16,0	13,4	12,8

Из данных таблицы 3.23 следует, что твердость поверхности, обработанной сверлением, в среднем возросла в 1,76 (среднее значение *HRC* 14,1).

3.4.1. Анализ корреляционной связи скорости резания, подачи и твердости отверстий

Данные таблицы 3.23 не дают однозначного ответа на вопрос о наличии и значимости связи между параметрами режимов резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий. Точный ответ на этот вопрос можно получить при применении методов статистического анализа результатов измерений в рамках корреляционного анализа. Первым шагом корреляционного анализа является выявление закономерности распределения результатов измерений [78, 85].

Проверка гипотезы о принадлежности результатов измерений твердости поверхности отверстий нормальному распределению проводилось в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 8.736-2011 [55]. В нашем случае выборка результатов измерений менее пятидесяти. Для аналогичных размеров выборки в соответствии с данным стандартом проверка гипотезы о принадлежности результатов измерений глубины дефектного поверхностного слоя нормальному распределению проводится с применением двух критериев. Для подтверждения соответствия результатов измерений закону Гаусса необходимо чтобы оба критерия выполнялись, в ином случае результаты измерений не могут быть признаны соответствующими нормальному распределению.

Первый критерий $\bar{d}$, вычисленный на основании зависимостей (2.2) и (2.3) лежит в пределах квантилей распределения для выбранного уровня значимости, т.е. $0,7304 \leq 0,8599 \leq 0,8768$ (табл. 2.5), что означает соответствие результатов измерений нормальному распределению.

В соответствии со вторым критерием результаты измерений можно считать принадлежащими нормальному распределению, если не более одной разности $|HRC - \overline{HRC}|$ превзошли значение $Z_{p/2} \times S$.

В нашем случае $Z_{p/2} = 2,33$ (табл. 2.7), $S = 2,9590$, $Z_{p/2} \times S = 6,89447$

Наибольшее значение разности $|HRC - \overline{HRC}|$ равно 6,2.

Таким образом, ни одно значение $|HRC - \overline{HRC}|$ не превзошло $Z_{p/2} \times S = 6,89447$ и, следовательно, можно считать, что результаты измерений твердости поверхности отверстий соответствуют нормальному распределению.

На основании структуры таблицы 2.8 и данных результатов измерений твердости поверхности отверстий (таблица 3.23) сформированы данные для оценки значимости связи между коррелируемыми параметрами (V и HRC) (табл. 3.24, табл. 3.25 и табл. 3.26).

Таблица 3.24 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий (*HRC*- τ) при подаче $S = 0,25$ мм/об

№	τ_i	V_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(V - \bar{V})$	$(V - \bar{V})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(V_i - \bar{V})$
1	11,7	2,18	-1,24	1,5376	-1,468	2,155024	1,82032
2	10,6	2,76	-2,34	5,4756	-0,888	0,788544	2,07792
3	13,0	3,45	0,06	0,0036	-0,198	0,039204	-0,01188
4	16,6	4,32	3,66	13,3956	0,672	0,451684	2,45952
5	12,8	5,53	-0,14	0,0196	1,882	3,541924	-0,26348
Σ				20,432		6,97628	6,0824

На основе зависимости (2.5) построена формула:

$$r = \frac{\sum (\tau_i - \bar{\tau})(V_i - \bar{V})}{\sqrt{\sum (\tau_i - \bar{\tau})^2 \sum (V_i - \bar{V})^2}}. \quad (3.7)$$

На основании данных таблицы 3.24 и формулы (3.7) имеем:

$$r = \frac{6,0824}{11,939} = 0,5095.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = 0,5095$ с данными таблицы 2.9, в которой представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.25 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий (*HRC*- τ) при подаче 0,2 мм/об

№	τ_i	V_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(V - \bar{V})$	$(V - \bar{V})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(V_i - \bar{V})$
1	11,5	2,18	2,32	5,3824	-1,468	2,1550	-3,40576
2	12,3	2,76	1,52	2,3104	-0,888	0,7885	-1,34976
3	12,7	3,45	1,12	1,2544	-0,198	0,0392	-0,22176
4	19,2	4,32	-5,38	28,9444	0,672	0,4516	-3,61536
5	13,4	5,53	0,42	0,17864	1,882	3,5419	0,79044
Σ				38,07024		6,97628	-7,8022

Используя формулу (3.7) и на основании данных таблицы 3.25 имеем:

$$r = \frac{-7,8022}{16,2969} = -0,479.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = -0,479$ с данными таблицы 2.9, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.26 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий ($HRC - \tau$) при подаче $S = 0,16$ мм/об

№	τ_i	V_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(V - \bar{V})$	$(V - \bar{V})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(V_i - \bar{V})$
1	12	2,76	2,175	4,730625	-1,255	1,575025	-2,729625
2	11,4	3,45	2,775	7,700625	-0,565	0,319225	-1,567875
3	17,3	4,32	-3,125	9,765625	0,305	0,093025	-0,953125
4	16,0	5,53	-1,825	3,330625	1,515	2,295225	-2,6764875
Σ				25,5275		4,2825	-8,0155

Формула (3.7) и данные таблицы 3.26 позволяют рассчитать значимость связи со скоростью на подаче 0,16 мм/об

$$r = \frac{-8,0155}{10,4557} = -0,767.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = -0,767$ с данными таблицы 2.9, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

На основании структуры таблицы 2.8 и данных результатов измерений твердостью поверхности обработанных отверстий (таблица 3.23) получены исходные данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий ($HRC - \tau$) на скоростях $V = 5,53$ м/мин, $V = 4,32$ м/мин и $V = 3,45$ м/мин, которые представлены в таблицах 3.27, 3.28 и 3.29

Таблица 3.27 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий (*HRC*- τ) на скорости резания $V = 5,53$ м/мин

№	τ_i	S_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(S_i - \bar{S})$
1	12,6	0,078	-0,62	0,3844	-0,075	0,005625	0,0465
2	12,5	0,1	-0,72	0,5184	-0,053	0,002809	0,03816
3	12,0	0,13	-1,22	1,4884	-0,023	0,000529	0,02806
4	16,0	0,16	2,78	7,7284	0,007	0,000049	0,01946
5	13,4	0,20	0,18	0,0324	0,047	0,002209	0,00846
6	12,8	0,25	-0,42	0,1764	0,097	0,009409	-0,04074
Σ				10,3284		0,02063	0,0999

Формула расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий, полученная на основе зависимости (2.5), будет иметь вид

$$r = \frac{\sum (\tau_i - \bar{\tau})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (\tau_i - \bar{\tau})^2 \sum (S_i - \bar{S})^2}}. \quad (3.8)$$

Используя данные табл. 3.27 рассчитаем коэффициент по зависимости (3.8)

$$r = \frac{0,0999}{0,4616} = 0,216.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = 0,216$ с данными таблицы 2.9, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.28 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий (*HRC*- τ) на скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	τ_i	S_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(S_i - \bar{S})$
1	19,3	0,1	0,76	0,5776	-0,068	0,004624	-0,05168
2	20,3	0,13	1,76	3,0976	-0,038	0,001444	-0,06688
3	17,3	0,16	-1,24	1,5376	-0,008	0,000064	0,00992
4	19,2	0,20	0,66	0,4356	0,032	0,001024	0,02112
5	16,6	0,25	-1,94	3,7636	0,082	0,006724	-0,15908
Σ				9,412		0,01388	-0,2476

По формуле (3.8) и данных табл. 3.28 определяем значимость связи между подачей и твердостью поверхности отверстий на скорости 4,32 м/мин.

$$r = \frac{-0,2476}{0,3614} = -0,682.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = -0,682$ с данными таблицы 2.9, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Таблица 3.29 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий ($HRC - \tau$) на скорости резания $V = 3,45$ м/мин

№	τ_i	S_i	$(\tau_i - \bar{\tau})$	$(\tau_i - \bar{\tau})^2$	$(S_i - \bar{S})$	$(S_i - \bar{S})^2$	$(\tau_i - \bar{\tau})(S_i - \bar{S})$
1	14,8	0,13	1,825	3,330625	-0,055	0,003025	-0,100375
2	11,4	0,16	-1,575	2,480625	-0,025	0,000625	0,039375
3	12,7	0,20	-0,275	0,075625	0,015	0,000225	-0,004125
4	13,0	0,25	0,025	0,000625	0,065	0,004225	0,001625
Σ				5,8875		0,0081	-0,0635

Используя данные табл. 3.29 по формуле (3.8) рассчитываем коэффициент корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий на скорости 3,45 м/мин:

$$r = \frac{-0,0635}{0,2184} = -0,291.$$

Сопоставляя полученное значение коэффициента корреляции $r = -0,291$ с данными таблицы 2.9, где представлены критические значения коэффициента корреляции Пирсона в зависимости от уровня его значимости, можно сделать вывод об его не значимости.

Итоги оценки значимости связи между подачей, скоростью резания и твердостью поверхности отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, имевших большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм, показывают (см. табл. 3.30) на отсутствие значимой связи между подачей,

скоростью резания и твердостью поверхности отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм [Таблица XII, 65].

Таблица 3.30 - Корреляция между параметрами режима резания и твердостью поверхности отверстий сверлами нормальной точности класса В

S, мм/об	связь V - HRC		V, м/мин	связь S - HRC	
	r			r	
0,16	-0,767	не значима	3,45	-0,291	не значима
0,2	-0,479	не значима	4,32	-0,682	не значима
0,25	0,5095	не значима	5,53	0,216	не значима

Аналогичным образом проведен корреляционный анализ результатов исследований, представленных в таблице 3.31.

В таблице 3.31 приведены средние значения твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм [66,67].

Таблица 3.31 – Твердость поверхности отверстий при сверлении сверлами повышенной точности класса А1

V, м/мин	S, мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
	HRC					
2,18					11,0	12,2
2,76				9,7	10,8	12,6
3,45			9,4	11,1	11,7	12,3
4,32		8,3	9,5	10,7	11,5	12,8
5,53	10,7	11,4	11,0	11,6	12,5	14,3

Средние значения твердости поверхности просверленных отверстий, получены в результате статистической обработки результатов измерений. Определение средних значений твердости посредством статистической обработки результатов измерений твердости в соответствии с принятой схемой

измерения (рисунок 2.20) при скорости резания $V = 5,53$ м/мин представлено в таблице 3.31.1.

Таблица 3.31.1 – Результаты измерений твердости поверхности отверстий при сверлении сверлами повышенной точности класса А1, $V = 5,53$ м/мин

Точки измерения	S , мм/об					
	0,078	0,1	0,13	0,16	0,2	0,25
	HRC					
1	9,8	12,4	11,3	9,5	10,7	13,9
2	8,9	9,2	10,6	12,5	11,3	13,4
3	12,6	11,2	11,8	10,5	12,3	15,6
4	11,5	10,7	12,3	13,4	14,7	14,5
5	10,7	13,5	11,9	12,1	13,5	14,1
HRC_{cp}	10,7	11,4	11,58	11,6	12,5	14,3

В представленных таблицах зависимость твердости отверстий от скорости и подачи присутствует. Результаты оценки корреляции между подачей, скоростью резания и твердостью поверхности отверстий, просверленных сверлами класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм, проведенной по аналогичной методике, примененной для случая обработки отверстий сверлами нормальной точности В, представлены в таблице 3.32.

Таблица 3.32 - Корреляция между параметрами режима резания и твердостью поверхности отверстий, обработанных сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части

S, мм/об	связь V - HRC		V, м/мин	связь S - HRC	
	r			r	
0,16	0,8546	не значима	3,45	0,9295	значима
0,2	0,9075	значима	4,32	0,99	значима
0,25	0,887	значима	5,53	0,934	значима

Представленные в данной таблице сведения показывают, что при сверлении сверлами класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, имеющих осевое биение режущих кромок не более 0,06 мм, имеет

место наличие значимой связи между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий при всех исследуемых подачах, за исключением подачи 0,16 мм/об. А между подачей и твердостью поверхности отверстий наблюдается значимая связь на всех скоростях резания [Таблица XII, 65].

Наличие значимой связи подтверждается графиками зависимостей твердости от скорости резания и подачи, на которых показана характерные прямые зависимости твердости отверстий, обработанных сверлами класса А1 (рисунки 3.4 и 3.5)

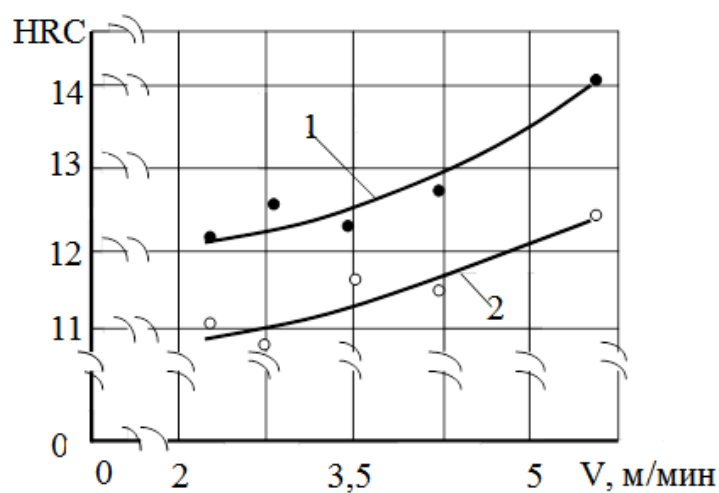


Рисунок 3.4 – Зависимость твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания, где 1 – $S = 0,25$ мм/об, 2 – $S = 0,2$ мм/об.

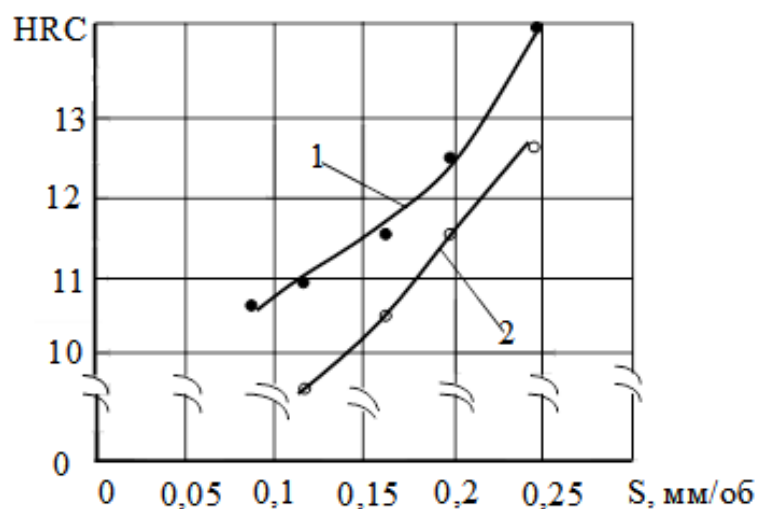


Рисунок 3.5 – Зависимость твердости обработанной поверхности отверстий от подачи, где 1 – $V = 5,53$ м/мин, 2 – $V = 4,32$ м/мин.

3.4.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от параметров режима резания

Кривые графиков рисунка 3.4 и рисунка 3.5 являются статистическими зависимостями, полученными усреднением нескольких измерений в каждой точке, поэтому аппроксимация этих зависимостей проводилась методом наименьших квадратов. Определялись коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей: прямой, степенной и экспоненциальной. Затем рассчитывался коэффициент корреляции каждой из них, и методом сравнительного анализа определялась зависимость наиболее адекватная результатам исследований.

3.4.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от подачи

$$(HRC = \tau)$$

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.33.

Таблица 3.33 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	τ_i	S_i	τ_i^2	S_i^2	$\tau_i S_i$	$\tau_i + S_i$	$(\tau_i + S_i)^2$
1	8,3	0,1	68,89	0,01	0,83	8,4	70,56
2	9,5	0,13	90,25	0,0169	1,235	9,63	92,7369
3	10,7	0,16	114,49	0,0256	1,712	10,86	117,9396
4	11,5	0,20	132,25	0,04	2,3	11,7	136,89
5	12,8	0,25	163,84	0,0625	3,2	13,05	170,3025
Σ	52,8	0,84	569,72	0,155	9,277		588,429

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\tau_i + S_i)^2 = \sum\tau_i^2 + 2\sum\tau_i S_i + \sum S_i^2 = 0,155 + 18,554 + 569,72 = 588,429$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам [57]:

$$b = \frac{n\sum\tau_i S_i - \sum\tau_i \sum S_i}{n\sum S_i^2 - (\sum S_i)^2} = \frac{5 \cdot 9,277 - 52,8 \cdot 0,84}{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2} = 29,29,$$

$$\alpha = \frac{\sum\tau_i - b\sum S_i}{n} = \frac{52,8 - 29,29 \cdot 0,84}{5} = 5,64.$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$HRC = 5,64 + 29,29S.$$

Проверка линейности полученной зависимости осуществляется посредством расчета коэффициента корреляции по формуле [79]:

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum S_i^2 - (\sum S_i)^2}{n\sum \tau_i^2 - (\sum \tau_i)^2}} = 29,29 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2}{5 \cdot 569,72 - (52,8)^2}} = 0,99.$$

Степенная зависимость

Заполняется таблица 3.34

Таблица 3.34 – Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	$\ln\tau_i$	$\ln S_i$	$(\ln\tau_i)^2$	$(\ln S_i)^2$	$\ln\tau_i \ln S_i$	$(\ln\tau_i + \ln S_i)^2$
1	2,116	-2,3	4,477456	2,29	-4,8668	0,033856
2	2,25	-2,04	5,0625	4,1616	-4,59	0,0441
3	2,37	-1,83	5,6169	3,3489	-4,3371	0,2916
4	2,44	-1,61	5,9536	2,5921	-3,9284	0,6889
5	2,55	-1,386	6,5025	1,920996	-3,5343	1,354896
Σ	11,726	-9,166	27,612956	17,313596	-21,2566	2,413352

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\tau_i + \ln S_i)^2 = \sum(\ln\tau_i)^2 + 2\sum\ln\tau_i \ln S_i + \sum(\ln S_i)^2 = 27,612956 - 2 \cdot 21,2566 + 17,313596 = 2,413352$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n\sum\ln\tau_i \ln S_i - \sum\ln\tau_i \sum\ln S_i}{n\sum\ln S_i^2 - (\sum\ln S_i)^2} = \frac{-5 \cdot 21,2566 + 11,726 \cdot 9,166}{5 \cdot 17,313596 - (-9,166)^2} = 0,4692$$

$$\ln a = \frac{\sum\ln\tau_i - b\sum\ln S_i}{n} = \frac{11,726 + 0,4692 \cdot 9,166}{5} = 3,2053, \quad a = 24,6638.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$HRC = 24,6638 \cdot S^{0,4692}.$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum\ln S_i^2 - (\sum\ln S_i)^2}{n\sum\ln\tau_i^2 - (\sum\ln\tau_i)^2}} = 0,4692 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 17,313596 - (-9,166)^2}{5 \cdot 27,612956 - (11,726)^2}} = 0,997.$$

Экспоненциальная зависимость

Заполняется таблица 3.35.

Таблица 3.35 – Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости при скорости резания $V = 4,32$ м/мин

№	$\ln\tau_i$	S_i	$(\ln\tau_i)^2$	S_i^2	$\ln\tau_i S_i$	$(\ln\tau_i + S_i)^2$
1	2,116	0,1	4,477456	0,01	0,2116	4,910656
2	2,25	0,13	5,0625	0,0169	0,2925	5,6644
3	2,37	0,16	5,6169	0,0256	0,3792	6,4009
4	2,44	0,20	5,9536	0,04	0,488	6,9696
5	2,55	0,25	6,5025	0,0625	0,6375	7,84
Σ	11,726	0,84	27,612956	0,155	2,0088	31,785556

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\tau_i + S_i)^2 = \sum \ln\tau_i^2 + 2\sum \ln\tau_i S_i + \sum S_i^2 = 27,612956 + 2 \cdot 2,0088 + 0,155 = 31,785556$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n\sum \ln\tau_i S_i - \sum \ln\tau_i \sum S_i}{n\sum S_i^2 - (\sum S_i)^2} = \frac{5 \cdot 2,0088 - 11,726 \cdot 0,84}{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2} = 2,7977,$$

$$\ln a = \frac{\sum \ln\tau_i - b \sum S_i}{n} = \frac{11,726 - 2,7977 \cdot 0,84}{5} = 1,8751864, \quad a = 6,522.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$HRC = 6,522 \cdot e^{2,7977}.$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum S_i^2 - (\sum S_i)^2}{n \sum \ln\tau_i^2 - (\sum \ln\tau_i)^2}} = 1,7876 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 0,155 - (0,84)^2}{5 \cdot 27,612956 - (11,726)^2}} = 0,98.$$

3.4.2.2. Определение коэффициентов регрессии твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.36.

Таблица 3.36 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	τ_i	V_i	τ_i^2	V_i^2	$\tau_i V_i$	$(\tau_i + V_i)^2$
1	8,3	2,18	68,89	4,7524	18,094	109,8304
2	9,5	2,76	90,25	7,6176	26,22	150,3076
3	10,7	3,45	114,49	11,9025	36,915	200,2225
4	11,5	4,32	132,25	18,6624	49,68	250,2724
5	12,8	5,53	163,84	30,5809	70,784	335,9889
Σ	52,8	18,24	569,72	73,5158	201,693	1046,6218

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\tau_i + V_i)^2 = \sum \tau_i^2 + 2\sum \tau_i V_i + \sum V_i^2 = 569,72 + 2 \cdot 201,693 + 73,5158 = 1046,6218.$$

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по формулам:

$$b = \frac{n\sum \tau_i V_i - \sum \tau_i \sum V_i}{n\sum V_i^2 - (\sum V_i)^2} = \frac{5 \cdot 201,693 - 52,8 \cdot 18,24}{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2} = 1,3014,$$

$$\alpha = \frac{\sum \tau_i - b \sum V_i}{n} = \frac{52,8 - 1,3014 \cdot 18,24}{5} = 5,8125.$$

Линейная зависимость имеет вид:

$$HRC = 5,8125 + 1,3014V.$$

Проверка линейности полученной зависимости осуществляется путем определения коэффициента корреляции по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n\sum \tau_i^2 - (\sum \tau_i)^2}} = 1,3014 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2}{5 \cdot 569,72 - (52,8)^2}} = 0,98.$$

Степенная зависимость

Заполняется таблица 3.37

Таблица 3.37 - Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	$\ln \tau_i$	$\ln V_i$	$(\ln \tau_i)^2$	$(\ln V_i)^2$	$\ln \tau_i \ln V_i$	$(\ln \tau_i + \ln V_i)^2$
1	2,116	0,779	4,477456	0,606841	1,648364	8,381025
2	2,25	1,015	5,0625	1,030225	2,28375	10,660225
3	2,37	1,238	5,6169	1,532644	2,93406	13,017664
4	2,44	1,643	5,9536	2,699449	4,00892	16,670889
5	2,55	1,71	6,5025	2,9241	4,3605	18,1476
Σ	11,726	6,385	27,612956	8,793259	15,235594	66,877403

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\tau_i + \ln V_i)^2 = \sum(\ln\tau_i)^2 + 2\sum\ln\tau_i \ln V_i + \sum(\ln V_i)^2 = 27,612956 + 2 \cdot 15,235594 + 8,793259 = 66,877403.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n\sum\ln\tau_i \ln V_i - \sum\ln\tau_i \sum\ln V_i}{n\sum\ln V_i^2 - (\sum\ln V_i)^2} = \frac{5 \cdot 15,235594 - 11,726 \cdot 6,385}{5 \cdot 8,793259 - (6,385)^2} = 0,415,$$

$$\ln a = \frac{\sum\ln\tau_i - b\sum\ln V_i}{n} = \frac{11,726 - 0,4088 \cdot 6,385}{5} = 1,8231624, \quad a = 6,1914.$$

Степенная зависимость имеет вид:

$$HRC = 6,1914V^{0,415}$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum\ln V_i^2 - (\sum\ln V_i)^2}{n\sum\ln\tau_i^2 - (\sum\ln\tau_i)^2}} = 0,409 \sqrt{\frac{5 \cdot 8,793259 - (6,385)^2}{5 \cdot 27,612956 - (11,726)^2}} = 0,99.$$

Экспоненциальная зависимость

Заполняется таблица 3.38

Таблица 3.38 - Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости при подаче $S = 0,2$ мм/об

№	$\ln\tau_i$	V_i	$(\ln\tau_i)^2$	V_i^2	$\ln\tau_i V_i$	$(\ln\tau_i + V)^2$
1	2,116	2,18	4,477456	4,7524	4,61288	18,455616
2	2,25	2,76	5,0625	7,6176	6,21	25,1001
3	2,37	3,45	5,6169	11,9025	8,1765	33,8724
4	2,44	4,32	5,9536	18,6624	10,5408	45,6976
5	2,55	5,53	6,5025	30,5809	14,1015	65,2864
Σ	11,726	18,24	27,612956	73,5158	43,64168	188,412116

Точности расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\tau_i + V_i)^2 = \sum\ln\tau_i^2 + 2\sum\ln\tau_i V_i + \sum V_i^2 = 27,612956 + 2 \cdot 54,58771 + 73,5158 = 188,412116.$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости определяются по формулам:

$$b = \frac{n\sum\ln\tau_i V_i - \sum\ln\tau_i \sum V_i}{n\sum V_i^2 - (\sum V_i)^2} = \frac{5 \cdot 43,64168 - 11,726 \cdot 18,24}{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2} = 0,124,$$

$$\ln a = \frac{\sum\ln\tau_i - b\sum V_i}{n} = \frac{11,726 - 0,124 \cdot 18,24}{5} = 1,89276, a = 6,6377.$$

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

$$HRC = 6,6377 \cdot e^{0,124V}.$$

Коэффициент корреляции определяется по формуле:

$$r = b \sqrt{\frac{n\sum V_i^2 - (\sum V_i)^2}{n\sum \ln\tau_i^2 - (\sum \ln\tau_i)^2}} = 0,124 \cdot \sqrt{\frac{5 \cdot 73,5158 - (18,24)^2}{5 \cdot 27,612956 - (11,726)^2}} = 0,97.$$

Аналогично определяются коэффициенты регрессии статистических зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от подачи на скорости резания 5,53 м/мин и твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания на подаче 0,25 мм/об. Результаты аппроксимации графических зависимостей, представленных на рисунке 3.4 и рисунке 3.5 приведены в таблице 3.39 и таблице 3.40.

Таблица 3.39 - Результаты аппроксимации зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от подачи

№ п/п	На скорости резания $V = 4,32$ м/мин	r	№ п/п	На скорости резания $V = 5,53$ м/мин	r
1	$HRC = 5,64 + 29,29S$	0,99	4	$HRC = 8,98 + 19,2S$	0,93
2	$HRC = 24,6638 \cdot S^{0,4692}$	0,997	5	$HRC = 18,447 \cdot S^{0,2261}$	0,92
3	$HRC = 6,522 \cdot e^{2,7977}$	0,98	6	$HRC = 9,332 \cdot e^{1,5676}$	0,95

Таблица 3.40 - Результаты аппроксимации зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания

№ п/п	На подаче $S = 0,2$ мм/об	r	№ п/п	На подаче $S = 0,25$ мм/об	r
1	$HRC = 5,8125 + 1,3014V$	0,98	4	$HRC = 10,757 + 0,571$	0,89
2	$HRC = 6,1914V^{0,415}$	0,99	5	$HRC = 10,9315V^{0,124}$	0,75
3	$HRC = 6,6377 \cdot e^{0,124V}$	0,97	6	$HRC = 10,912 \cdot e^{0,0439V}$	0,9

3.4.3. Построение эмпирической модели зависимости твердости от параметров режима резания

Аппроксимация графических зависимостей твердости поверхности отверстия от подачи и скорости резания, представленных на рисунке 3.4 и рисунке 3.5, позволила определить коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей для сочетания скоростей резания и подач, показанных в таблице 3.39 и таблице 3.40 [66]. Сравнительный анализ коэффициентов корреляции показал, что наиболее адекватными результатам исследований являются степенные зависимости №2 в таблице 3.39 ($r = 0,997$) и №2 в таблице 3.40 ($r = 0,99$), которые следует использовать для получения обобщенной эмпирической зависимости. Указанные зависимости имеют вид (3.9) и (3.10)

$$HRC = 24,6638 \cdot S^{0,4692}, \quad (3.9)$$

$$HRC = 6,1914 \cdot V^{0,415}. \quad (3.10)$$

Разработка эмпирической модели заключается в определении постоянного коэффициента a зависимости (3.11) с использованием результатов испытаний, представленных в таблице 3.30 следующим образом [79].

$$HRC = aV^{0,415}S^{0,4692}, \quad (3.11)$$

$$a_i = \frac{HRC_i}{V^{0.415} S^{0.4692}} \quad (3.12)$$

Постоянный коэффициент a определяется посредством зависимости (3.13):

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (3.13)$$

На основании данной методики получена эмпирическая модель расчета твердости поверхностного слоя просверленных отверстий при варьировании скорости резания и подачи, которая имеет следующий вид

$$HRC = 13,315V^{0,415}S^{0,4692} \quad (3.14)$$

Сравнительный анализ адекватности эмпирической модели (3.14) результатам настоящих исследований (табл. 3.41) проведен посредством сопоставления фактических и рассчитанных значений твердости поверхности обработанных отверстий и определения расхождения этих значений.

Таблица 3.41 - Адекватность эмпирической модели (3.14) результатам настоящих исследований

V, м/мин	S = 0,2 мм/об			S = 0,25 мм/об		
	HRC факт., мм	HRC расч., мм	погр., %	HRC факт., мм	HRC расч., мм	погр., %
4,32	11,5	11,48	0,17	12,8	12,6	1,56
5,53	12,5	12,72	1,76	14,3	14,12	1,3
			ср.0,97			ср. 1,43

Из таблицы 3.22 видно, что среднее расхождение фактических и расчетных значений, полученных по эмпирической модели (3.14) не превышает 1,43%, при максимальном значении погрешности 1,76%, что для эмпирической модели,

полученной методами математической статистики является достаточно высокой точностью.

Высокая точность эмпирической модели (3.14) позволяет прогнозировать твердость обработанной сверлением поверхности отверстий. Например, на скорости резания 6 м/мин и подаче 0,3 мм/об твердость обработанной поверхности составит *HRC* 15,92, при этом твердость обработанной сверлением поверхности возрастет практически в два раза.

3.5. Физические закономерности повышения качества поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами.

Значительные силы резания на лезвиях спиральных сверл и их конструктивные особенности [68] приводят к изменению физико-механических свойств обработанной поверхности просверленных отверстий и повышают ее твердость. Силы резания на лезвиях спиральных сверл показаны на рисунке 3.6.

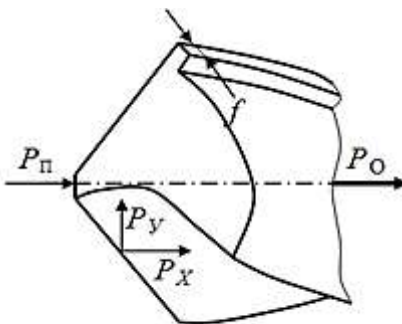


Рисунок 3.6 - Составляющие силы резания спирального сверла:

P_O —осевая сила, P_{Π} — осевая сила поперечного лезвия,
 P_X — осевая сила главного лезвия, P_Y — радиальная сила главного лезвия

Глубина дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий зависят от радиальной силы P_Y . Существующие справочники по обработке деталей резанием не содержат информации по учету силы P_Y при сверлении, формулы для ее расчета отсутствуют [69, 70, 77].

Автор работы [71] на основании экспериментальных исследований приводит соотношение между составляющими сил резания при точении резцами с углом $\varphi=45^\circ$, углом $\lambda=0^\circ$ и углом $\gamma=15^\circ$ при отношении глубины резания к подаче, превышающем 10 раз: $P_Z:P_Y:P_X = 1:0,5:0,3$. На основании того, что зубом любого режущего инструмента, в том числе и сверла, является резец [72] это соотношение можно использовать для получения соотношения сил резания при сверлении в виде: $P_Y:P_X=1,65$. Известно, что отношение $P_Y:P_X$ при неизменной глубине резания зависит от угла в плане φ . В таблице 3.42 приведена относительная величина осевой силы P_O при различных углах φ при сверлении стали средней твердости [72].

Таблица 3.42 - Величина осевой силы P_O при различных углах φ

Значение угла φ		
45°	60°	75°
Относительная величина P_O		
0,97	1	1,04

Из таблицы 3.42 видно, что при увеличении угла φ от 45° до 60° относительная величина P_O увеличивается, что соответственно приведет к уменьшению отношения $P_Y:P_X$ следующим образом $1,65 \times 0,97 = 1,6$.

При обработке сверлением формула для расчета осевой силы имеет вид (3.15)

$$P_O = 10C_P D^q S^y K_P, \text{ Н.} \quad (3.15)$$

Значение коэффициента C_P и K_P и показателей степеней формулы (3.15) приведены в таблице 3.43 [51].

Таблица 3.43- Значение коэффициента C_P и K_P и показателей степеней формулы (3.15)

C_P	q	y	K_P
68	1,0	0,7	0,75

Для сверл диаметром 11 мм осевая сила, рассчитанная по формуле (3.15) при рекомендуемой подаче $S = 0,25$ мм/об [6], равна $P_O = 2126$ Н (212,6 кгс).

Осевая сила при сверлении складывается из трех составляющих сил резания $P_O = P_{\Pi} + 2P_X$ (рисунок 3.6). Доля осевой силы поперечного лезвия P_{Π} в осевой силе составляет 60% [68]. Тогда суммарная осевая сила главных лезвий составит $2P_X = 850$ Н (85 кгс). С учетом соотношения $P_Y:P_X = 1,6$ радиальная сила одного главного лезвия будет равна $P_Y = 680$ Н (68 кгс).

В результате вышеприведенного анализа определен коэффициент $C_{PY} = 35,34$ при использовании которого и зависимости (3.15) получена зависимость (3.16) для расчета радиальной силы на каждом главном лезвии при сверлении:

$$P_Y = C_{PY} D^q (0,5S)^y K_P, \text{ кгс.} \quad (3.16)$$

Вследствие наличия погрешности заточки спиральных сверл силы P_Y главных лезвий сверла различаются, что приводит к появлению равнодействующей радиальной силы ΔP_Y . Основные причины возникновения погрешностей заточки происходят в результате неравенства углов φ и смещения поперечной кромки, как показано на рисунке 3.7. Неравенство углов φ также приводит к неравенству длин главных режущих кромок.

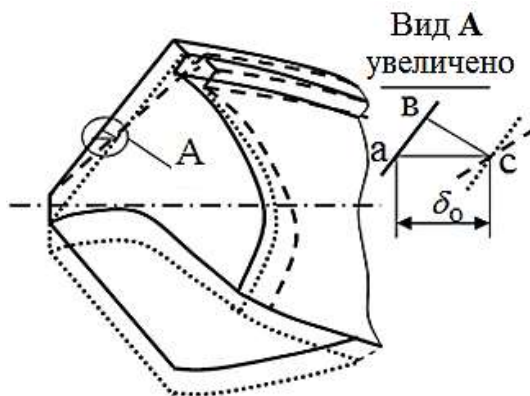


Рисунок 3.7 - Погрешности заточки сверл в результате смещения поперечной кромки , неравенства углов φ - - - -

Стандарт регламентирует допуск биения, проверяемый посередине главных режущих кромок в перпендикулярном им направлении (рисунок 3.7, вид А, сторона bc треугольника abc). Однако основное влияние на осевую силу оказывает осевое биение режущих кромок, от которого зависит распределение подачи между зубьями сверла. Регламентированные стандартом [44] допуски биения сверл диаметром 11 мм и допуски осевого биения сверл этого диаметра (рисунок 3.7, вид А, сторона $ac = \delta_o$ треугольника abc) представлены в таблице 3.44

Таблица 3.44- Допуск биения и допуск осевого биения сверл

Допуск биения сверл классов точности		
A1	B1	B
0,11	0,2	0,3
Допуск осевого биения δ_o сверл классов точности		
A1	B1	B
0,14	0,23	0,35

Из таблицы 3.44 видно, что допуск осевого биения сверл класса точности B1 практически равен рекомендуемой подаче на оборот сверла [6], а допуск осевого биения сверл класса точности B значительно превышает величину рекомендуемой подачи. В этом случае в формировании обработанной поверхности будет участвовать только один зуб сверла с равнодействующей радиальной силой $\Delta P_y = P_y = 68$ кгс.

С использованием зависимости (3.16) разработана зависимость (3.17) позволяющая рассчитать большую радиальную силу на одном зубе сверла при осевом биении меньшем величины подачи:

$$P_{y\text{з}} = C_{py} D(0,5S + \delta_o)^{0,7} K_p. \quad (3.17)$$

Большая радиальная сила, рассчитанная по зависимости (3.17) для сверл класса точности A1 диаметром $D = 11$ мм, имеющих двухплоскостную заточку

режущей части и осевое биение $\delta_o = 0,06$ мм равна $P_{yB} = 89,5$ кгс. Тогда меньшая радиальная сила на другом зубе сверла будет равна $P_{yM} = 136 - 89,6 = 46,4$ кгс. В этом случае равнодействующая радиальная сила равна $\Delta P_y = 89,6 - 68 = 21,6$ кгс.

Выше приведены результаты измерения глубины дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий сверлами класса точности В с осевым биением 0,3 мм (табл.3.2) и сверлами класса точности А1 с осевым биением 0,06 мм (табл.3.10). Среднее значение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности В составляет $\bar{\delta} = 54,35$ мкм. Среднее значение глубины дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 составляет $\bar{\delta} = 19,77$ мкм.

У сверл класса точности А1 при рекомендуемой подаче на оборот сверла [51] равной 0,25 мм/об равнодействующая радиальная сила $\Delta P_y = 21,6$ кгс, а у сверл класса точности В $\Delta P_y = 68$ т.е. в 3,15 раз больше, чем у сверл класса точности А1, при этом среднее значение глубины дефектного слоя больше 2,75 раза, (54,35 и 19,77 соответственно), что практически соответствует увеличению равнодействующей радиальной силы. Это означает, что уменьшение глубины дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий сверлами класса точности А1 по сравнению с отверстиями просверленными сверлами класса точности В происходит за счет уменьшения равнодействующей радиальной силы.

Равнодействующая сила ΔP_y зависит от величины подачи. Поэтому большую точность оценки характера ее влияния следовало ожидать от сравнения функциональных зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи сверл сравниваемых классов точности В и А1. Однако отсутствие такой зависимости у сверл класса точности В не позволяет сделать этого. Это подтверждается результатами корреляционного анализа взаимосвязи между подачей и глубины дефектного поверхностного слоя, представленного в таблице 3.45.

Таблица 3.45 - Коэффициент линейной корреляции Пирсона r между подачей и глубиной дефектного слоя и твердостью поверхности отверстий

V, м/мин	Сверла класса точности В		Сверла класса точности А1	
	$r \quad \delta$		$r \quad \delta$	
4,32	-0,168	не значима	0,890	значим
5,53	0,616	не значима	0,876	значим
	$r \text{ HRC}$		$r \text{ HRC}$	
4,32	-0,682	не значима	0,99	значим
5,53	0,216	не значима	0,934	значим

Из таблицы 3.45 видно отсутствие значимой корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя у сверл класса точности В [Таблица XII 65]. Поэтому оценке подлежали средние значения сравниваемых величин, что не противоречит правилам математической статистики.

Из таблицы 3.45 также видно наличие значимой корреляции между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя и твердостью поверхности отверстий у сверл класса точности А1 [Таблица XII, 65].

Значимый коэффициент корреляции предполагает наличие прямой функциональной зависимости глубины дефектного слоя и твердости поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1 от подачи. Характер этих зависимостей представлен графиками на рисунках 3.3 и 3.5 представленных выше.

На рисунках показано, что глубина дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, просверленных сверлами класса точности А1, имеет прямую зависимость от подачи.

В таблице 3.46 представлены рассчитанные по зависимости (3.17) большие радиальные силы сверл класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

Таблица 3.46 – Большие радиальные силы сверл класса точности А1

S , мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
$P_{УБ}$, кгс	57,76	62,19	68,0	73,6	80,8	89,5

На рисунке 3.8 приведен график зависимости большой радиальной силы от подачи, представленные в таблице 3.46.

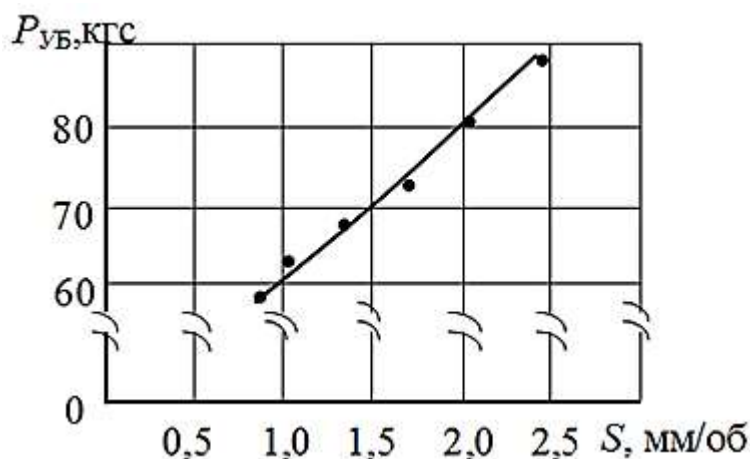


Рисунок 3.8 - Зависимость большей радиальной силы от подачи, сверла класса точности А1

На рисунке 3.8 видно, что большая радиальная сила равномерно возрастает с увеличением подачи, что определяет прямую зависимость глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от подачи.

Конструктивные особенности спиральных сверл выражаются в том, что каждый зуб спирального сверла имеет три режущих кромки, участвующие в формировании отверстия в сплошном материале: поперечная кромка, главная режущая кромка и вспомогательная кромка ленточки на участке равном половине подачи на оборот сверла. Помимо этого, имеется еще один конструктивный элемент – уголок, являющийся линией пересечения главного и вспомогательного режущих лезвий. Непосредственное воздействие на обработанную поверхность оказывают вспомогательные кромки ленточек и уголки, которые находятся в сплошном контакте с обработанной поверхностью из-за отсутствия задних углов на ширине ленточки f (рисунок 3.6). Процесс резания при отсутствии задних углов невозможен, вспомогательные кромки ленточек и уголки не режут, а деформируют (сминают) обработанную поверхность, оказывая на нее калибрующее воздействие, и повышают твердость поверхности просверленных отверстий. Этому способствуют равнодействующая

радиальная сила ΔP_y и большая радиальная сила $P_{уб}$, непосредственно зависящая от подачи.

Вследствие отсутствия влияния скорости резания на силы резания при сверлении в справочной литературе в формулах расчета осевой силы резания скорость резания не присутствует. [51,71,72]. Однако выше приведены эмпирические зависимости глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от скорости резания при сверлении сверлами класса А1 (рисунки 3.2 и 3.4). Из этих графических зависимостей следует, что с увеличением скорости резания глубина дефектного поверхностного слоя уменьшается, а твердость поверхности отверстия увеличивается.

В результате воздействия силы, вызывающей смещение центра масс сверла по причине погрешностей изготовления конструктивных элементов в пределах их допусков, наблюдается увеличение разбивки отверстий с увеличением скорости резания. Сила, вызывающая смещение центра масс сверла:

$$F = m\omega^2 l, \quad (3.18)$$

где m – масса конструктивного элемента, ω – угловое ускорение, l – величина радиального смещения центра масс.

Квадрат углового ускорения в зависимости (3.18) показывает существенное влияние скорости резания на силу F . Эта сила действует даже при отсутствии погрешностей заточки режущей части спиральных сверл и своим влиянием способствует увеличению твердости поверхности просверленных отверстий.

В работе [73] представлена эмпирическая зависимость температуры в зоне резания от скорости резания, имеющая вид

$$\Theta = 37,824V^{0,7328}. \quad (3.19)$$

Рассчитанные по зависимости (3.19) температуры в зоне резания на различных скоростях резания показаны на рисунке 3.9.

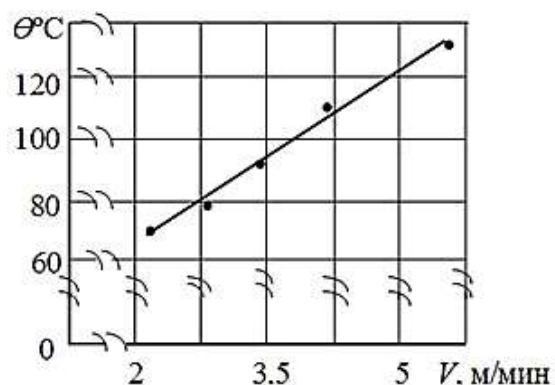


Рисунок 3.9 - Зависимость температуры в зоне резания от скорости резания, на подаче $S = 0,25$ мм/об, сверла класса точности А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм

Из эмпирической зависимости прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры (рисунок 3.10), представленной в работе [74], видно существенное изменение прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали при температурах ниже 200°C (участки 1-2 кривых рисунка 3.10).

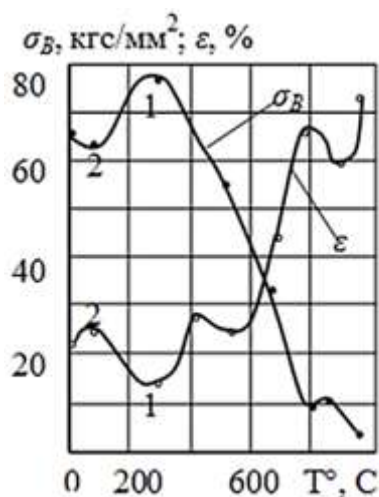


Рисунок 3.10 - Зависимость прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры, где ϵ - степень деформации, характеризующая пластичность материала, σ_B - предел прочности.

С увеличением скорости резания от 2,18 м/мин до 5,53 м/мин температура в зоне резания растет в пределах от 100°C до 200°C (рисунок 3.9). Как видно на рисунке 3.10 температуры 100°C - 200°C принадлежат участку 1-2 рисунка 3.10,

на котором с увеличением температуры прочность углеродистых сталей растет, а пластичность уменьшается. Вследствие этого, как видно из рисунка 3.4, с увеличением скорости резания твердость поверхности обработанного отверстия повышается. Также сравнительный анализ графических зависимостей, представленных на рисунках 3.2, 3.9 и 3.10, показывает, что увеличение прочности и снижение пластичности углеродистых сталей при увеличении скорости резания способствует уменьшению глубины дефектного поверхностного слоя.

В результате проведенных исследований выявлены физические закономерности влияния условий обработки спиральными сверлами на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий:

- погрешности заточки режущей части сверл (неодинаковая величина главных углов в плане, длин главных режущих кромок, смещение поперечной кромки) вызывают неравенство радиальных сил P_y на зубьях сверл, которое приводит к появлению равнодействующей радиальной силы ΔP_y направленной в сторону действия большей силы P_y и увеличивающей ее. Равнодействующая радиальная сила непосредственно формирует дефектный слой поверхности просверленных отверстий. Большая радиальная сила зависит от подачи и равномерно возрастает с увеличением подачи. Характер зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от подачи определяется характером зависимости от подачи большей радиальной силы;

- увеличение скорости резания при наличии погрешности конструктивных элементов сверл приводят к увеличению силы, вызывающий смещение центр масс сверла, что в свою очередь приводят к увеличению разбивки просверленных отверстий. Эта сила имеет место даже при отсутствии погрешностей заточки сверл и в свою очередь способствует повышению твердости поверхности просверленных отверстий;

- увеличение скорости резания до 5,53 м/мин приводит к увеличению температуры резания до 200°С, в пределах которой прочность углеродистой стали растет, а пластичность падает. Поэтому твердость поверхности просверленных отверстий растет с увеличением скорости резания, а глубина дефектного поверхностного слоя уменьшается.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Корреляционный анализ позволил выявить наличие значимой связи параметров режимов резания с глубиной дефектного поверхностного слоя и твердостью поверхности отверстий, просверленных сверлами повышенной точности класса А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм, и отсутствие значимой связи параметров режимов резания с глубиной дефектного поверхностного слоя и твердостью поверхности отверстий, просверленных сверлами нормальной точности класса В с осевым биением режущих кромок 0,3 мм.

2. Регрессионный анализ результатов исследований позволил разработать эмпирические модели, с высокой степенью точности отражающие влияние скорости резания и подачи на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, просверленных сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей и осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

3. В результате проведенных исследований выявлены физические закономерности влияния режимов резания на силы резания, разбивку отверстий и температуру в зоне резания, позволившие обосновать снижение глубины дефектного поверхностного слоя и повышения твердости поверхности обработанных отверстий.

4. Предложенная конструкция сверла за счет зачистки поверхности отверстия вспомогательными режущими кромками обеспечивает повышение качества обработанной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

1. Разработана методология планирования, организации и проведения экспериментов, объектом которого являются глубина дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий.

2. Экспериментально выявлено наличие влияния скорости резания и подачи на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий. Получены зависимости, отражающие влияние скорости резания и подачи на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, просверленных стандартными спиральными сверлами.

3. Получены эмпирические модели, отражающие влияние параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий и позволяющие при обработке отверстий высокой точности значительно снизить число технологических операций, тем самым повысит качество изделий машиностроения и снизить их себестоимость.

4. Разработан и обоснован метод повышения качества поверхностного слоя отверстий при обработке сверлением, состоящий из: спирального сверла повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, с осевым биением режущих кромок не превышающим 0,06 мм; эмпирической модели, позволяющей выбрать параметры режима резания в зависимости от требуемой глубины дефектного поверхностного слоя в пределах 25 мкм; эмпирической модели, позволяющую определить твердость поверхности просверленных отверстий в зависимости от выбранных параметров режима резания.

5. Разработана конструкция сверла повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, обеспечивающая повышение качества обработанной поверхности, новизна которой подтверждена патентом КР.

6. Результаты диссертационной работы используется в учебном процессе в при изучении специальных дисциплин «Исследование материалов и процессов», «Нормирование точности и технические измерения» и «Повышение стойкости спиральных сверл и качества обработки сверлением» на кафедре «Технология машиностроения» КГТУ им. И Раззакова и приняты к внедрению в производство на промышленных предприятиях ОсОО «Алаташ» и ОсОО «Автомаш-Рadiator», что подтверждается соответствующими актами внедрения.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рагрин, Н. А. Обработка материалов и инструменты [Текст]: учеб. / А. Н. Рагрин. – Бишкек: Текник, 2012. – 156 с.
2. Ткачев, А. Г. Технология машиностроения [Текст]: курс лекций / А. Г. Ткачёв, И. Н. Шубин. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2009. – 164 с.
3. Алимов, А. И. Поверхностные слои и методы их формирования [Текст] / А. И. Алимов // Машиностроение. — М., 2002. — С. 312 с.
4. Технология машиностроения [Текст] / под общ. ред. А. М. Дальского. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – Т. 1. – 564 с.
5. Управление качеством поверхности при финишной обработке деталей выглаживанием [Текст]: учеб. пособие / В. Ф. Губанов, В. В. Марфицын, В. Н. Орлов, А. Г. Схиртладзе. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2007. – 84 с.
6. Кожевников, Д. В. Резание материалов [Текст]: учеб. / Д. В. Кожевников, С. В. Кирсанов. – М.: Машиностроение, 2012. – 304 с.
7. Рахимьянов, Х. М. Влияние кинематики деформационного воздействия на формирование поверхностного слоя при комбинированной обработке материалов [Текст] / Х. М. Рахимьянов, Ю. В. Никитин // Современные электротехнологии в машиностроении: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Тула, 2002. – С. 351–364.
8. Халл, Д. Введение в дислокации [Текст] / Д. Халл. – М.: Атомиздат, 1968. – 295 с.
9. Цаплин, А. И. Основы научных исследований в технологии машиностроения [Текст]: учеб. пособие / А. И. Цаплин. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014 – 228 с.
10. Основы материаловедения [Текст] / под ред. А. В. Смирнова. – М.: Машиностроение, 1976. – 272 с.
11. Розанова, А. М. Структура белых фаз после термической обработки [Текст] / А. М. Розанова, Л. И. Симаков // Металловедение и термическая обработка металлов. – М., 1979. – № 5. – С. 173. 11.

12. Коршунов, В. Я. Разработка научных основ формирования параметров состояния поверхностного слоя деталей машин в процессе резания [Текст] / В. Я. Коршунов // Изв. вузов Сев.-Кавказ. регион. техн. науки. Спец. вып. – 2005. – С. 73–78.
13. Технологические остаточные напряжения [Текст] / под ред. А. В. Подзей. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
14. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве [Текст] / [А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и др.]. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
15. Губанов, В. Ф. Новый способ финишной обработки давлением [Текст] / В. Ф. Губанов, В. Н. Орлов, Д. А. Маслов // Технология машиностроения. – М., 2005. – № 12(42). – С. 20–21.
16. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
17. Яковлев, Г. М. Технологические основы надежности и долговечности машин [Текст] / Г. М. Яковлев. – Минск: Беларусь, 1964. – 315 с.
18. Остаточные напряжения [Текст] / под ред. В. Р. Осгуда. – М.: Иностран. лит., 1957. – 395 с.
19. Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении [Текст]: учеб. пособие / [В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузменко, В. Н. Крылов и др.]. – 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 2007. – 539 с.
20. Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей [Текст] / [А. М. Дальский, Т. М. Барсукова, Л. Н. Бухарин и др.]. – М.: Машиностроение, 2004. – 559 с.
21. Теоретические основы процессов поверхностного пластического деформирования [Текст] / [Е. М. Макушок, Т. В. Калиновский, С. М. Красневский и др.]; под ред. В. И. Беляева. – Минск: Наука и техника, 1988. – 182 с.

22. Управление качеством поверхности при финишной обработке деталей выглаживанием [Текст]: учеб. пособие / В. Ф. Губанов, В. В. Марфицын, В. Н. Орлов, А. Г. Схиртладзе. – Курган: Изд-во Курган. гос. ун-та, 2007. – 84 с.

23. Чепа, П. А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием [Текст] / П. А. Чепа. – Минск: Наука и техника, 1981. – 291 с.

24. Самсонов, В. А. Технологическое обеспечение качества изделий в машиностроении [Текст]: учеб. пособие для выполнения выпускных квалификацион. работ и магистер. дис. / В. А. Самсонов, Т. Э. Сартов, М. К. Сопоев. – Бишкек: ИЦ Текник, 2016. – 304 с.

25. Мухин, В. С. Технологические методы обеспечения качества поверхности деталей [Текст] / В. С. Мухин. – Уфа: УАИ, 1981. – 73 с.

26. Косенко, А. И. Влияние режимов резания на температуру при точении [Текст]: метод. указ. к лаб. работе / А. И. Косенко. – Великий Новгород: НовГУ, 2000. – 36 с.

27. Филяев, А. Т. Исследование износостойкости деталей, упрочненных наклепом [Текст] / А.Т. Филяев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 217 с.

28. Сулима, А. М. Качество поверхностного слоя и усталостная прочность деталей из жаропрочных и титановых сплавов [Текст] / А. М. Сулима, М. И. Евстигнеев. – М.: Машиностроение, 1974. – 193 с.

29. Смелянский, В. М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / В. М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.

30. Папшев, Д. Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д. Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.

31. Филяев, А. Т. Исследование износостойкости деталей упрочненных наклепом [Текст] / А.Т. Филяев. – Минск: Наука и техника, 1974. – 217 с.

32. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариками [Текст] / Д. Д. Папшев. — М. Машиностроение, 1968. — 132 с.

33. Бойко Н.И. Ресурсосберегающие технологии повышения качества поверхностных слоев деталей машин [Текст] / учебное пособие для вузов ж.д. транспорта. — М. : Маршрут, 2006. — 198 с.

34. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Справочник. — М. : Машиностроение, 1987. — 328 с.

35. Проскорякова Ю.А. Методика проектирования технологических процессов центробежной обработки [Текст] / // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9. № 01. — С. 82 – 90.

36. Новикова Т.И., Толстикова Ю.А., Сафронов М.В. Перспективы развития ультразвуковой обработки [Текст] /// Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. № 10. — С. 29 – 30.

37. Вишняков, М.А. Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения [Текст]: учеб. пособие / М. А. Вишняков, Ю. А. Вашуков. – М.: СГАУ им. С. П. Королева, 2005. – 83 с.

38. Анурьев, В. И. Справочник конструктора-машиностроителя [Текст]: в 3 т. / В. И. Анурьев; под ред. И. Н. Жестковой. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – Т. 1. – 920 с.

39. Зленко, М. А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст]: пособие для инженеров / М. А. Зленко, М. В. Нагайцев, В. М. Довбыш. – М.: ГНЦ РФ ФГУП НАМИ, 2015. – 220 с.

40. Елютин, О. П. Сплавы с аморфной структурой [Текст] / О. П. Елютин // Металловедение и термическая обработка. – 1960. – № 8. – С. 10–14.

41. ГОСТ 10903-77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком. Основные размеры [Текст]. Взамен ГОСТ 10903-64; МН 5808-65; Введ. 01.01.1979. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 10 с.

42. Пат. Кыргызская Республика № 264. Сверло [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева; Кыргызпатент. – Заявл. 20180009.2; Оpubл. 30.06.2019.

43. ГОСТ 4010-77. Группа Г 23. Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Короткая серия. Основные размеры [Текст]. Взамен ГОСТ 4010-

64; МН 181-65; МН 555-65; Введ. 1979-01.01. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 26 с.

44. ГОСТ 2034-80. Сверла спиральные. Технические условия [Текст]. Вмен ГОСТ 2034-64; ГОСТ 5.619-78; Введ. 01.01.82. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 9 с.

45. Клаасен, К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике [Текст] / К. Б. Клаасен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.

46. Бирюков, С. В. Методы и средства измерений [Текст]: учеб. пособие / С. В. Бирюков, А. И. Чередов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 88 с.

47. Тартаковский, Д. Ф. А. Метрология, стандартизация и технические средства измерений [Текст]: учеб. для вузов / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. – М.: Высш. шк., 2001. – 205 с.

48. Дивин, А. Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля [Текст]: учеб. пособие: в 5 ч. / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. – Ч. 1. – 104 с.

49. Рябов, В. П. Методы и средства измерений, испытаний и контроля [Текст] / В. П. Рябов, Е. С. Позняк. – М.: МУГП, 2009. – 157 с.

50. Ранеев, Г. Г. Методы и средства измерений [Текст] / Г. Г. Ранеев, А. П. Тарасенко. – М.: Академия, 2006. – 336 с.

51. Справочник технолога – машиностроителя [Текст]: в 2-х т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова, А. Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 1. – 912 с.

52. Рагрин, Н. А. Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении [Текст] / Н. А. Рагрин // Технология Машиностроения. – М., 2013. – № 12. – С.15–24.

53. ГОСТ 9013-59. Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. [Текст]. Введ. 01.01.69. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 9 с.

54. Рагрин, Н. А. Математическая обработка экспериментальных данных [Текст] / Н. А. Рагрин; КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: ИЦ Текник, 2013. – 82 с.

55. ГОСТ 8.736-2011. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения [Текст] / Нац. стандарт РФ. – Утв. и введ. 13 дек. 2011 г., № 1045-ст. – М.: Стандартинформ, 2013. – 24 с.

56. Рагрин, Н. А. Разработка и обоснование путей повышения качества поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Технология машиностроения. – М., 2020. – № 7. – С. 55–60.

57. Рагрин, Н. А. Разработка методов повышения качества отверстий сверлением, обработанных сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Науч. обозрение. – М., 2020. – № 1. – С. 32–48.

58. Дыйканбаева, У. М. Повышения качества поверхностного слоя просверленных отверстий, обработанных сверлением [Текст] / У. М. Дыйканбаева, Н. А. Рагрин // Изв. Кырг. гос. техн. ун-т. – Бишкек, 2021. – № 2(58). – С. 21–25.

59. Повышение качества поверхностного слоя отверстий [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева, А. А. Айнабекова, Д. М. Курганова // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-т. – Бишкек, 2021. – № 12(21). – С. 112–118.

60. Дыйканбаева, У. М. Повышения качества поверхностного слоя просверленных отверстий [Текст] / У. М. Дыйканбаева, Н. А. Рагрин // Тр. 14 общерос. науч.-практ. конф.: Инновационные технологии и техн. средства спец. назначения. – СПб., 2022. – Т. 1, № 81. – С. 117–121.

61. Лукомский, Я. И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства [Текст] / Я. И. Лукомский. – М.: Машиностроение, 1961. – 375 с.

62. Рагрин, Н. А. Разработка и обоснование закономерностей повышения показателей качества отверстий, обработанных сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, А. А. Айнабекова, У. М. Дыйканбаева // Изв. Кырг. гос. техн. ун-т. – Бишкек, 2018. – № (46). – С. 77–89.

63. Справочник технолога – машиностроителя [Текст]: в 2-х т. / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – Т. 2. – 944 с.

64. Повышение качества поверхностного слоя отверстий при обработке сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, У. Д. Дыйканбаева, А. А. Айнабекова, Д. М. Курганова // Машиноведение. – Бишкек, 2021. – № 2 (14). – С.76–82.

65. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений [Текст] / М., 1968.- 288 с.

66. Рагрин, Н. А. Обеспечение качества поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева, Д. М. Курганова // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2022. – Т. 22, № 4. – С. 79–85.

67. Разработка модели упрочнения поверхностного слоя отверстий сверлением [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева, А. А. Айнабекова, Д. М. Курганова // Технология машиностроения. – М., 2022. – № 6 (240). – С. 11–15.

68. Рагрин Н.А. Физическая модель стойкостной зависимости при сверлении [Текст] // Технология машиностроения. – М., 2012. - № 11. - С. 11 – 17.

69. Рагрин, Н. А. Разработка физической модели формирования дефектного поверхностного слоя отверстий, просверленных спиральными сверлами [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2023. – Т. 23, № 8. – С. 63–71.

70. Рагрин, Н. А. Разработка физических закономерностей влияния условий обработки спиральными сверлами на твердость поверхности просверленных отверстий [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Технология машиностроения. – М., 2023. – № 10. – С. 20–26.

71. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов [Текст] / – М.: Машиностроение. 1975. – 344с., ил.

72. Г.И. Грановский, П.П. Грудов и др. Резание металлов [Текст] / – М.: Машгиз, 1954,- 471 с.

73. Рагрин, Н. А. Разработка основ повышения качества отверстий, обработанных стандартными спиральными сверлами [Текст] / Н. А. Рагрин, У.

М. Дыйканбаева, А. А. Айнабекова // Технология машиностроения. – М., 2023. – № 1 (247). – С. 5–12.

74. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением [Текст]: учеб. для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – изд. 4-е., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

75. Повышение качества отверстий обработанных сверлением. Учебное пособие для вузов [Текст] / Н.А.Рагрин, Айнабекова А.А., У.М.Дыйканбаева // КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: ИЦ «Калем», 2023. – 108 с.

76. Рагрин Н. А., Обоснование статистических методов повышения качества технических экспериментов [Текст] / Рагрин Н. А., Дыйканбаева У.Д., Курганова Д.М. // Машиноведение.- Бишкек, 2024. № 1 (19) – С. 103-111.

77. Рагрин, Н. А. Разработка физических закономерностей формирования дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий на основе физической модели [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Изв. Кырг. гос. техн. ун-та им. И. Раззакова. – Бишкек, 2023. – № 12(58). – С. 1481–1493.

78. Рагрин, Н. А. Корреляционный анализ результатов технических испытаний [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Машиноведение. – Бишкек, 2023. – Т. 1, № 1. – С. 102–115.

79. Рагрин, Н. А. Регрессионный анализ технических исследований для построения эмпирических моделей [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева, Д. М. Курганова // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2023. – Т. 23, № 4. – С. 94–100.

80. Рагрин, Н. А. Разработка методов статистического анализа эмпирических технических исследований [Текст] / Н. А. Рагрин, Д. М. Курганова, У. М. Дыйканбаева // Технология машиностроения. – М., 2023. – № 9. – С. 20–25.

81. Научные основы упрочнения поверхностного слоя просверленных отверстий [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева, А. А. Айнабекова, Д. М. Курганова // Технология машиностроения. – М., 2022. – № 12. – С. 21–26.

82. Рагрин, Н. А. Разработка метода повышения качества поверхностного слоя отверстий при сверлении [Текст] / Н. А. Рагрин, У. М. Дыйканбаева // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2022. – Т. 22, № 12. – С. 80–85.

83. Рагрин, Н. А. Научные основы повышения качества поверхности обработанной быстрорежущими спиральными сверлами [Текст] / Н. А. Рагрин, А. А. Айнабекова, У. М. Дыйканбаева // Технология машиностроения. – М., 2017. – № 5. – С. 13–16.

84. Диссертация на тему: «Разработка методов и рекомендаций по повышению качества обработки отверстий спиральными сверлами», на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. [Текст] / А. А. Айнабекова, – Бишкек, 2025.

85. Рагрин, Н. А. Обоснование метода выбора факторов эксперимента для разработки эмпирической модели. [Текст] / Н. А. Рагрин, А. А. Айнабекова. // Вестн. Кырг.-Рос. Славян. ун-та. – Бишкек, 2023. – Т. 23, № 12. – С. 109–116.

ПРИЛОЖЕНИЯ



КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ПАТЕНТ

№ 264

Название полезной модели: *Сверло*

Патентовладелец, страна: *Кыргызско-Российский Славянский университет (KG)*

Автор (авторы): *Рагип Н. А., Дыйканбаева У. М. (KG)*

Заявка № *20180009.2*

Приоритет полезной модели: *15 мая 2018 года*

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей
Кыргызской Республики: *30 июня 2019 года*

Патент под ответственность заявителя (владельца) на данную полезную модель удостоверяет исключительное право патентовладельца на владение, использование, а также запрещение использования другими лицами на территории Кыргызской Республики

001746



(19) KG (11) 264 (46) 31.07.2019

(51) B23B 51/02 (2019.01)

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
И ИННОВАЦИЙ ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ

к патенту Кыргызской Республики под ответственность заявителя

(21) 20180009.2.

(22) 15.05.2018

(46) 31.07.2019. Бюл. № 7

(71) (73) Кыргызско-Российский Славянский университет (KG)

(72) Рагрин Н. А., Дыйканбаева У. М. (KG)

(56) ГОСТ 4010-77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Короткая серия. Основные размеры. - С. 20

(54) Сверло

(57) Полезная модель относится к спиральным сверлам для обработки отверстий.

Задачей полезной модели является повышение стойкости сверл и качества поверхности обработанных отверстий за счет наличия заточенных участков ленточек на длине

равной половине осевой подачи от режущей части сверла.

Задача решается тем, что сверло имеющее направляющую и режущую части, два зуба, задние поверхности которых на периферии режущей части заточены задним углом α равным 11° - 12° , подточку ленточек под углом 6° - 8° на длине 1,5-4 мм от режущей части, цилиндрические участки ленточек на местах подточки при этом участки ленточек заточены задним углом равным углу заточки задних поверхностей на периферии режущей части на длине равной половине осевой подачи от режущей части сверла.

1 н. п. ф., 3 фиг.

(19) KG (11) 264 (46) 31.07.2019

3

Полезная модель относится к спиральным сверлам для обработки отверстий.

Известно сверло (ГОСТ 4010-77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком. Короткая серия. Основные размеры. - С. 20), имеющее направляющую и режущую части, два зуба, задние поверхности которых на периферии режущей части заточены задним углом α , подточку ленточек под углом $6^\circ-8^\circ$ на длине 1,5-4 мм от режущей части, цилиндрические участки ленточек на местах подточки. Такая подточка ленточек производится с целью уменьшения их трения о стенки просверливаемого отверстия и повышения стойкости сверла.

Недостатком известного устройства является наличие цилиндрических участков ленточек на местах подточки, которые трутся о стенки просверливаемого отверстия, что снижает стойкость сверла.

Задачей полезной модели является повышение стойкости сверл и качества поверхности обработанных отверстий за счет наличия заточенных участков ленточек на длине равной половине осевой подачи от режущей части сверла.

Задача решается тем, что сверло, имеющее направляющую и режущую части, два зуба, задние поверхности которых на периферии режущей части заточены задним углом α равным $11^\circ-12^\circ$, подточку ленточек под углом $6^\circ-8^\circ$ на длине 1,5-4 мм от режущей части, цилиндрические участки ленточек на местах

4

подточки при этом участки ленточек заточены задним углом равным углу заточки задних поверхностей на периферии режущей части на длине равной половине осевой подачи от режущей части сверла.

На чертеже, фиг. 1 - вид сверла в плане, фиг. 2 - вид сверла в проекции на горизонтальную плоскость, фиг. 3 - участки направляющей и режущей частей в плане.

Сверло имеет режущую 1 и направляющую 2 части, два зуба 3, задние поверхности которых 4 на периферии режущей части заточены задним углом α . На направляющей части расположены ленточки 5, которые заточены углом равным углу заточки задних поверхностей на периферии режущей части α на длине равной половине подачи от режущей части сверла.

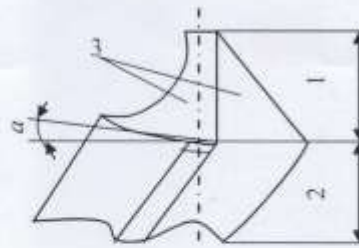
Сверло работает следующим образом. Сверлу сообщают вращательное движение и осевое перемещение - подачу S_0 . Главные режущие кромки срезают основной слой обрабатываемого материала, формируя отверстие, заточенные участки ленточек, как вспомогательные режущие кромки, подчищают поверхность отверстия.

Стойкость сверл и качество обработанной поверхности повышается за счет отсутствия трения ленточек о стенки просверливаемого отверстия и зачистки поверхности отверстия вспомогательными режущими кромками.

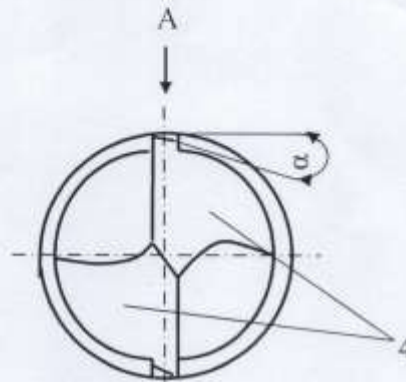
Формула полезной модели

Сверло, имеющее направляющую и режущую части, два зуба, задние поверхности которых на периферии режущей части заточены задним углом α равным $11^\circ-12^\circ$, подточку ленточек под углом $6^\circ-8^\circ$ на длине 1,5-4 мм от режущей части, цилиндрические участ-

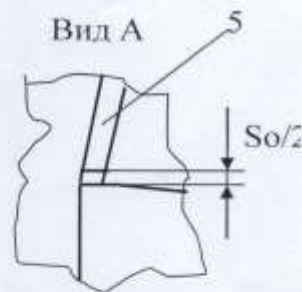
ки ленточек на местах подточки, отличающееся тем, что участки ленточек заточены задним углом равным углу заточки задних поверхностей на периферии режущей части на длине равной половине осевой подачи от режущей части сверла.



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Выпущено отделом подготовки официальных изданий

Государственная служба интеллектуальной собственности и инноваций при Правительстве Кыргызской Республики,
720021, г. Бишкек, ул. Московская, 62, тел.: (312) 68 08 19, 68 16 41; факс: (312) 68 17 03

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ОсОО «Ала-Таш»
Чипалиев О.К.
11 ноября 2024г.



Акт внедрения результатов научно-исследовательских, научно-технических работ, результатов научной и научно-технической деятельности

1. **Автор внедрения:** соискатель Дыйканбаева Урпия Маматкадыровна
2. **Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и результатов научной и научно-технической деятельности:** разработка метода повышения качества поверхностного слоя отверстий при сверлении.
3. **Краткая аннотация:** в работе представлены методы повышения качества поверхностного слоя отверстий, в части снижения глубины дефектного поверхностного слоя до 25 мкм и повышения твердости поверхности отверстий.
Это позволяет уменьшить трудоемкость обработки высокоточных отверстий диаметром 10...16 мм за счет исключения следующих переходов: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное и чистовое развёртывание.
4. **Эффект от внедрения:** повышение качества и снижение трудоемкости изготовления продукции.
5. **Место и время внедрения:** ОсОО «Ала-Таш» г. Бишкек, ул. Самойленко 7/2 от 11 ноября 2024г.
6. **Форма внедрения:** по результатам диссертационной работы разработаны рекомендации, которые будут использованы при изготовлении продукции предприятия.

Представитель организации, в которую внедрена разработка
Р.И. Копылов – директор ОсОО «Ала-Таш»



Представитель организации, из которого исходит внедрение
Э.С. Абдраимов - д.т.н., профессор, заведующей кафедрой
Технологии машиностроения, КИТУ им. И. Раззакова






Акт внедрения результатов научно-исследовательских, научно-технических работ, результатов научной и научно-технической деятельности

1. **Автор внедрения:** соискатель Дыйканбаева Урпия Маматкалыровна
2. **Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и результатов научной и научно-технической деятельности:** разработка метода повышения качества поверхностного слоя отверстий при сверлении.

1. Краткая аннотация: в работе представлены методы повышения качества поверхностного слоя отверстий, что позволяет уменьшить трудоемкость обработки высокоточных отверстий диаметром 10...16 мм за счет исключения следующих переходов: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное и чистовое развёртывание. Разработана методика моделирования и проведения исследований по повышению эффективности процесса сверления.

3. Эффект от внедрения: повышение качества подготовки студентов, магистрантов и аспирантов.

4. Место и время внедрения: Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова от 21 ноября 2024г.

5. Форма внедрения: результаты работ внедрены в учебный процесс, материалы диссертационной работы включены в учебное пособие «Повышение качества отверстий обработанных сверлением» и в учебник «Повышение стойкости спиральных сверл и качества обработки сверлением». Рекомендуются студентам, магистрам и аспирантам технических вузов машиностроительных направлений и специальностей, а также преподавателям, специалистам, деятельность которых связана с технологией металлов, металлообработкой, технологией изготовления изделий.

Представитель организации, в которую внедрена разработка
К.М. Дыканалиев – к.т.н., доцент, начальник учебного управления
КГТУ им. Раззакова

Представитель организации, из которого исходит внедрение
Э.С. Абдраимов - д.т.н., профессор, заведующей кафедрой
Технологии машиностроения, КГТУ им. И. Раззакова



«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ОсОО «АВТОМАШ-РАДИАТОР»
Владимир Ю.А.
15 ноября 2024г.



Акт внедрения результатов научно-исследовательских, научно-технических работ, результатов научной и научно-технической деятельности

1. **Автор внедрения:** соискатель Дыйканбаева Урпия Маматкадыровна
2. **Наименование научно-исследовательских, научно-технических работ и результатов научной и научно-технической деятельности:** разработка метода повышения качества поверхностного слоя отверстий при сверлении.
3. **Краткая аннотация:** в работе представлены методы повышения качества поверхностного слоя отверстий, в части: снижения глубины дефектного поверхностного слоя до 25 мкм и повышения твердости поверхности отверстий. Это позволяет уменьшить трудоемкость обработки высокоточных отверстий диаметром 10...16 мм за счет исключения следующих переходов: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное и чистовое развертывание.
4. **Эффект от внедрения:** повышение качества и снижение трудоемкости изготовления продукции.
5. **Место и время внедрения:** ОсОО «Автомаш-Радиатор» г. Бишкек, ул. Матросова 1А/1 от «15» ноября 2024г.
6. **Форма внедрения:** по результатам диссертационной работы разработаны рекомендации, которые будут использованы при изготовлении продукции предприятия.

Представитель организации, в которую внедрена разработка

В.Н. Ласунов - главный технолог
ОсОО «АВТОМАШ-РАДИАТОР»

Представитель организации, из которого исходит внедрение
Э.С. Абдраимов - д.т.н., профессор, заведующей кафедрой
Технологии машиностроения, КИТУ им. И. Раззакова

И. РАЗЗАКОВ АТЫРАСАТЫ
КЫРГЫС МАШИНОСТРОИТЕЛ
ТЕХНИКАЛЫК УНИВЕРСИТЕТИ
13.11.2024

