

**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 – 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И РАЗРАБОТКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	10
1.1. Показатели качества поверхностного слоя деталей машин.....	10
1.1.1. Кристаллическое строение металлов.....	11
1.1.2. Дефекты кристаллических решеток и их влияние на прочность металлов.....	12
1.2. Физическая сущность упрочнения металла наклепом.....	20
1.3. Виды и причины статочных напряжений.....	22
1.4. Технологические методы упрочнения поверхностного слоя деталей.....	27
1.4.1. Гидродробеструйное упрочнение.....	28
1.4.2. Пневмодробебетное упрочнение.....	29
1.4.3. Упрочнение микрошариками.....	30
1.4.4. Вибрационное упрочнение.....	32
1.4.5. Обработка методом обкатывания.....	34
1.4.6. Метод термопластического упрочнения.....	36
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1.....	40
ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	41
2.1. Станок.....	41
2.2. Приспособление.....	44
2.3. Инструмент.....	44
2.5. Деталь.....	47
2.6. Методы контроля качества просверленных отверстий.....	48
2.6.1. Квалитет допуска.....	48
2.6.2. Методы контроля качества поверхностного слоя просверленных отверстий.....	50
2.6.2.1. Глубина дефектного поверхностного слоя.....	50
2.6.4.2. Контроль упрочнения поверхностного слоя отверстий.....	55

2.7. Методы статистического анализа экспериментальных данных.....	57
2.7.1. Методы корреляционно-регрессионного анализа.....	57
2.7.2. Методика определения закона распределения случайной величины.....	61
2.7.3 Методы корреляционного анализа экспериментальных данных	58
2.7.4. Методы регрессионного анализа статистических зависимостей.....	61
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2.....	62
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 Физические закономерности высокого качества отверстий полученных сверлением.....	68
3.3. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от параметров режима резания.....	78
3.3.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от подачи.....	82
3.3.2 Определение коэффициентов регрессии зависимостей глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания.....	82
3.4. Построение эмпирической модели зависимости глубины дефектного поверхностного слоя отверстий от параметров режима резания.....	89
3.4.1. Методика разработки обобщенной эмпирической модели.....	90
3.5. Упрочнение поверхностного слоя отверстий.....	92
3.5.1. 3.5.1. Корреляционный анализ влияния параметров режима резания на твердость поверхности просверленных отверстий.....	93
3.5.2. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от параметров режима резания.....	102
3.5.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости	

обработанной поверхности отверстий от подачи на скорости резания 4,32 м/мин.....	103
3.5.2.2. Определение коэффициентов регрессии твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания на подаче $S = 0,2$ мм/об.....	103
3.5.3. Построение эмпирической модели зависимости твердости от параметров режима резания.....	110
ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3.....	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	112
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЫ.....	113
ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ.....	114
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	115
Приложение 1.....	122
Приложение 2.....	126
Приложение 3.....	127
Приложение 4.....	128

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.

Задачи исследований:

1. Разработать условия обработки сверлением, при которых имеет место влияние параметров режима резаний на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий просверленных стандартными спиральными сверлами.
2. Определить и обосновать характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий просверленных стандартными спиральными сверлами.
3. Разработать эмпирическую модель влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий просверленных стандартными спиральными сверлами.
4. Разработать методологию планирования, организации и проведения исследований объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

Научная новизна полученных результатов:

1. Определен и обоснован характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.
2. Экспериментально получены зависимости глубины дефектного поверхностного слоя и твердости поверхности просверленных отверстий от параметров режима резания.
3. Установлено, что на скоростях резания меньших бм/мин, твердость конструкционной стали уменьшается при одновременной повышении её пластичности.
4. Определены и обоснованы условия обработки сверлением, при которых ленточки сверл помимо направляющей функции выполняют калибровку поверхностного слоя просверленных отверстий.

5. Разработаны эмпирические модели, отражающие влияние параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Разработаны условия обработки сверлением, при которых имеет место влияние параметров режима резаний на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий. Разработанные условия обработки сверлением отверстий высокого качества используются в производственных процессах предприятий г. Бишкек. Акт внедрения в производство (Приложение 1).

2. Разработана методология планирования, организации и проведения исследований объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания. Методология легла в основу методических указаний «Методы контроля качества обработанной поверхности и поверхностного слоя» используемых в учебном процессе магистрантов КГТУ им. И. Раззакова. Акт внедрения в учебный процесс (Приложение 2).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты исследований характера влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и прочности поверхности просверленных отверстий в виде эмпирических табличных и графических зависимостей.

2. Эмпирические модели, отражающие характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и упрочнение поверхности просверленных отверстий, позволяющие получить обработкой стандартными быстрорежущими спиральными сверлами отверстия соответствующие качеству поверхностного слоя после нормального развертывания с более чем двукратным повышением прочности поверхности.

3. Условия обработки сверлением позволяющие использовать

стандартные быстрорежущие спиральные сверла для получения отверстий имеющих глубину дефектного слоя менее 25 мкм с более чем двукратным повышением прочности поверхности.

4. Методология планирования, организации, проведения исследований, отличающаяся от известных методологий тем, что объектом исследования являются показатели качества поверхностного слоя отверстий, обработанных стандартными быстрорежущими спиральными сверлами, в зависимости от скорости резания и подачи.

Личный вклад соискателя. Основные научные результаты исследований получены соискателем лично. 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 11 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 131 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 74 таблицы, библиографию из 73 наименований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ И РАЗРАБОТКА 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.

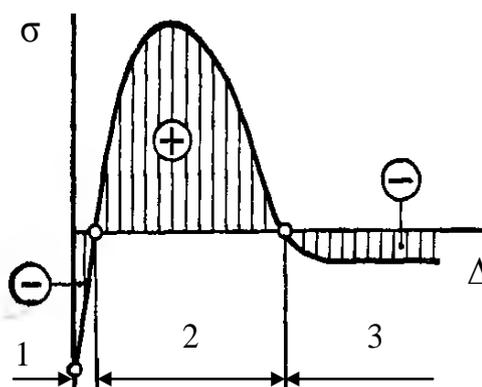


Рисунок 1.1 - Эпюра изменения остаточных напряжений в зависимости от расстояния от обработанной поверхности

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].

1.1.1. Кристаллическое строение металлов

При остывании из жидкого состояния металлы приобретают атомно-кристаллическое строение, схематически показанное на рисунке 1.2. Оно заключается в том, что атомы или молекулы располагаются друг относительно друга не произвольно, а в определенном порядке. Закономерность их расположения, зависит от структуры элементарной атомной ячейки [4].

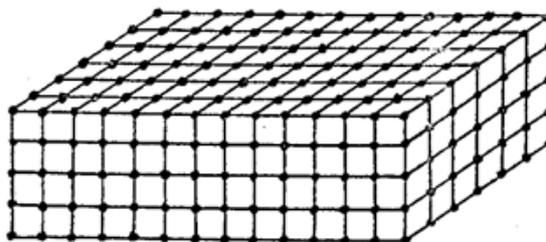


Рисунок 1.2 - Схема кристаллического строения α -железа при отсутствии дефектов решетки

Металлы и их сплавы, образуют различные атомные ячейки (некоторые из них схематически показаны на рисунке 1.3, но для одного и того же металла при постоянной температуре и равных прочих условиях (давление и др.) они одинаковы и располагаются друг относительно друга также одинаково, образуя так называемую кристаллическую решетку [5].

Основными типами кристаллических решеток являются:

Объемно — центрированная кубическая (ОЦК) (рисунок 1.3, а), атомы располагаются в вершинах куба и в его центре;

Гранецентрированная кубическая (ГЦК) (рисунок 1.3, б), атомы располагаются в вершинах куба и по центру каждой из 6 граней;

Гексагональная (ГС) (рис. 1.3, в), в основании которой лежит шестиугольник. Различают гексагональную простую – атомы располагаются в вершинах ячейки и по центру двух оснований, и гексагональную плотноупакованную у которой имеется три дополнительных атома в средней плоскости [6].

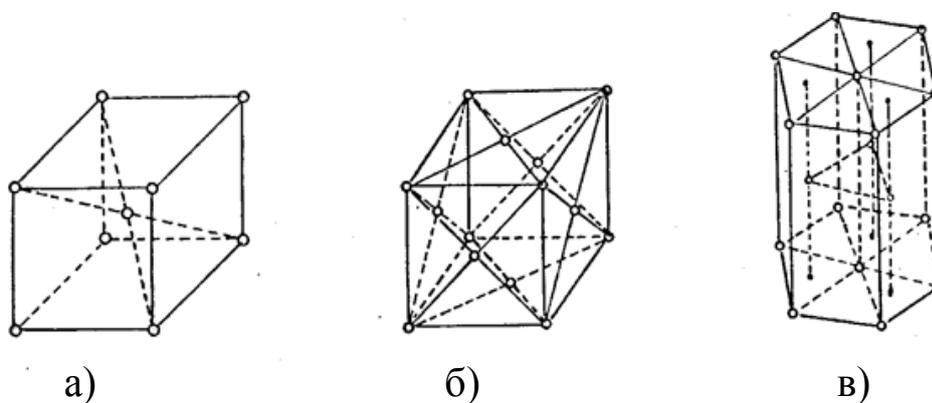


Рисунок 1. 3 - Элементарные кристаллические решетки

1.1.2. Дефекты кристаллических решеток и их влияние на прочность металлов

Однако металлы и их сплавы не имеют в объеме детали машины непрерывного правильного кристаллического строения. Технические металлы, из которых в настоящее время изготавливают детали, имеют много нарушений,

т.е. дефектов кристаллической решетки. Они, прежде всего, имеют зернистую микроструктуру (рисунок 1.4), ввиду чего ориентация кристаллической решетки к каждому зерне своя, отличная от других зерен. А в пределах каждого зерна имеются другие дефекты кристаллической решетки.

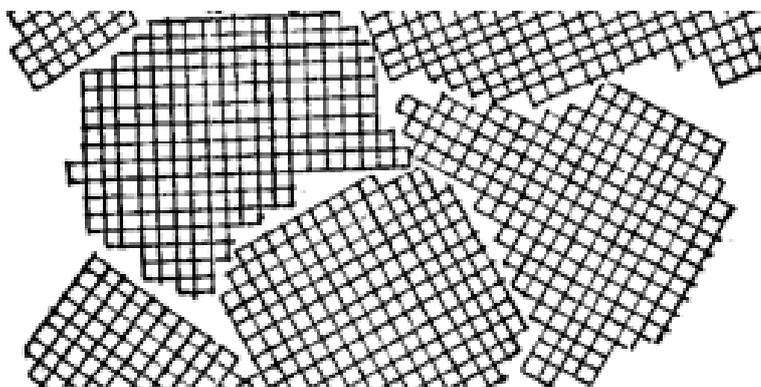


Рисунок 1.4 - Зернистость микроструктуры металлов поверхностные (между зернами) дефекты кристаллической решетки

Такие металлы обладают прочностью, которая называется технической. Это та прочность, которую показывают результаты испытаний на разрыв образцов из обычных металлов. Показатели технической прочности, имеющиеся в справочниках, значительно ниже, теоретической прочности металлов [7].

Теоретическую прочность металлов рассматривают в условиях идеальной решетки монокристалла, т.е. при отсутствии каких-либо дефектов кристаллической их структуры.

При испытании на разрыв образца из технического металла (рисунок 1.5,а) вначале образуется шейка, после чего происходит ее разрыв (рисунок 1.5,б) по значительно меньшему поперечному сечению (поверхности 1 и 2). Тогда как при испытании на разрыв образца, обладающего теоретической прочностью теоретически предполагается разъединение (разрыв) деформируемого образца или детали одновременно по всему поперечному сечению (рисунок 1.5,в), что характеризуется величиной энергии образования

двух новых поверхностей 3 и 4 при абсолютно хрупком разрушении [8].

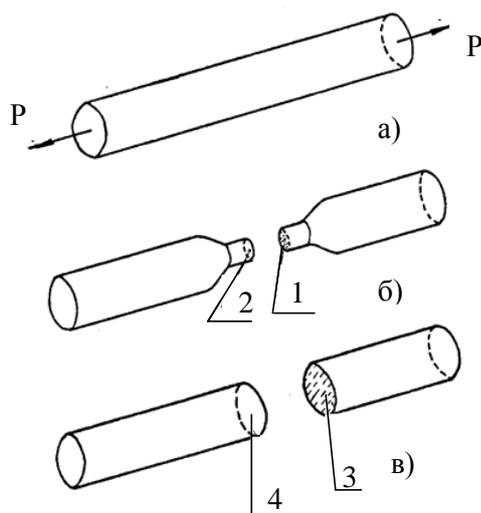


Рисунок 1.5- Растяжение металлического образца (а) с разрывом по шейке (б) при наличии дефектов кристаллической решетки и без шейки (в) при отсутствии указанных дефектов

Зная энергию образования двух новых поверхностей, расчетным путем можно определить прочность на разрыв при растяжении твердого тела. Она равна от 0,1 до 0,5 модуля упругости при растяжении и в десятки раз превосходит значения прочности реальных металлов, т.е. их техническую прочность. Экспериментальное изучение прочности полученных нитевидных кристаллов (без наличия дефектов строения их решетки) диаметром 0,001мм показало, что их прочность близка к теоретической [9]. Например, прочность при растяжении нитевидных кристаллов железа составляет 1336, меди-302, цинка-225 кгс/мм², а прочность этих же реальных металлов соответственно составляет 30; 22 и 18 кгс/мм².

Теоретическая прочность соответствует идеально правильному и непрерывному кристаллическому строению металлов во всем объеме образца или детали. Например, деталь из железа будет иметь теоретическую прочность, если она будет во всем объеме состоять из правильных и непрерывно друг к другу примыкающих объемно-центрированных кубических атомных ячеек (рисунок 1.3,а). По углам и в центре объемно-центрированного куба (ОЦК)

находится атом железа, так что каждой ячейке в сплошном объеме металла принадлежит 2 атома железа [10].

Эксперименты, выполненные в состоянии невесомости (в космосе), позволяют предполагать о принципиальной возможности в будущем выращивать кристаллы для приборов и деталей машин без дефектов кристаллической решетки, обладающие прочностью равной теоретической. Первые опыты получения различных сплавов при направленной кристаллизации их в космосе показали возможность избежания ликвации (неоднородности, вызываемой в земных условиях осаждением более тяжелых компонентов), а также "полосчатой" неоднородности, вызываемой конвективными потоками в расплавленном металле (ввиду различия температур кристаллизации различных компонентов, т.е. наличия интервала температуры кристаллизации сплава), которые также связаны с действием силы тяжести.

Однако реальные детали не имеют такого правильного сплошного строения. При остывании металла во время его плавки процесс кристаллизации одновременно начинается во многих точках. Расположение элементарных ячеек в каждой из них произвольное, ввиду чего получается зернистая структура, нарушающая сплошность правильного кристаллического строения [11].

На форму и свойства полученных в космосе материалов влияют также силы поверхностного и межфазового натяжения. Особенности действия этих сил следует объяснить выделение газовых пузырьков только на поверхности получаемых кристаллов при полном их отсутствии внутри материала, т.е. осуществляется самопроизвольная дегазация. Влиянием поверхностных сил в земных условиях, видимо, следует объяснить резкое изменение у ряда сложных полупроводников состава и структуры в поверхностном слое толщиной 30-40 мкм [12].

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: 1) точечные, 2) линейные, 3) поверхностные [13].

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 - (рисунок 1.6). К точечным дефектам относятся: а) вакансии, т.е. свободные узлы в атомно-кристаллической решетке (в которых нет атома - рисунок 1.6, 1,2); б) промежуточные атомы, смещенные в междоузлия (рисунок 1.6,3,4), а также атомы примесей, которые могут или замещать атомы металла в решетке (рисунок 1.6,5), или быть внедренными в междоузлия (рисунок 1.6,6) [14].

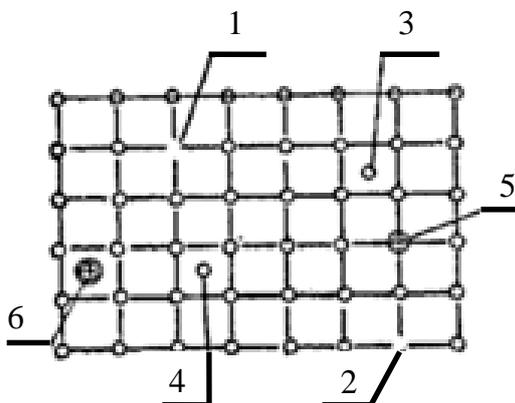


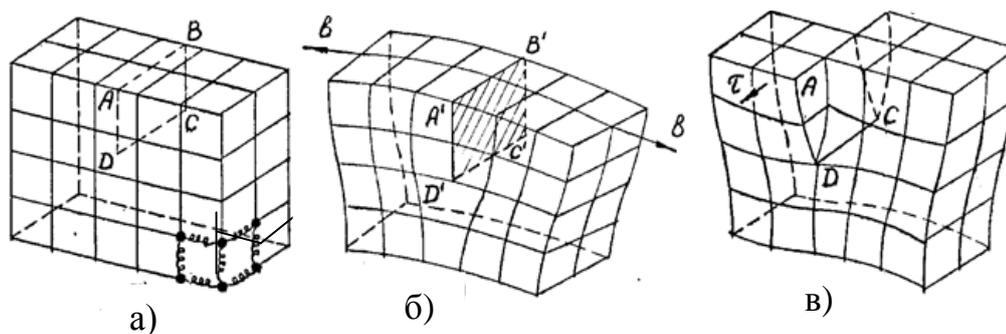
Рисунок 1.6 - Точечные дефекты кристаллов: 1,2 – вакансии; 3,4 - смещенные атомы в междоузлах; 5,6-атомы примесей

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 [15].

При повышении температуры происходит тепловое движение атомов, средняя амплитуда их колебаний увеличивается, и количество вакансий возрастает, однако не превышает 1-2%. Благодаря тепловому движению атомов вакансии, смещения 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. В кристалле (зерне), находящемся в условиях теплового равновесия, имеется конечное число вакансий [14].

Образование и исчезновение вакансий в твердом теле вызывает уменьшение и увеличение его плотности. Искусственно можно создать избыток вакансий для данной температуры (закалкой, прокаткой, бомбардировкой атомами или частицами с высокой энергией и др.).

На рисунке 1.7, а показана схема кубического кристалла, в котором междуатомные связи представлены в виде пружин [15]. Если разорвать атомные связи, пересекаемые плоскостью ABCD, растянуть верхнюю часть кристалла в направлении BB', перпендикулярном указанной плоскости, и в образовавшийся разъем вставить лишний атомный слой A'B'C'D' (рисунок 1.7,б), то линия C'D' явится краевой дислокацией. Вектор сдвига и дислокация взаимно перпендикулярны. Плоскости решетки вокруг дислокации сильно искажены (изогнуты). Винтовая дислокация (рисунок 1.7, в) получается при смещении частей кристалла в направлении AB, т.е. в параллельном к плоскости



ABCD направлении (вектор сдвига τ и плоскость сдвига параллельны).

Рисунок 1.7 - Дислокации (линейные дефекты) кристаллов

Схемы краевой и винтовой дислокаций показаны также на рисунке 1.8.

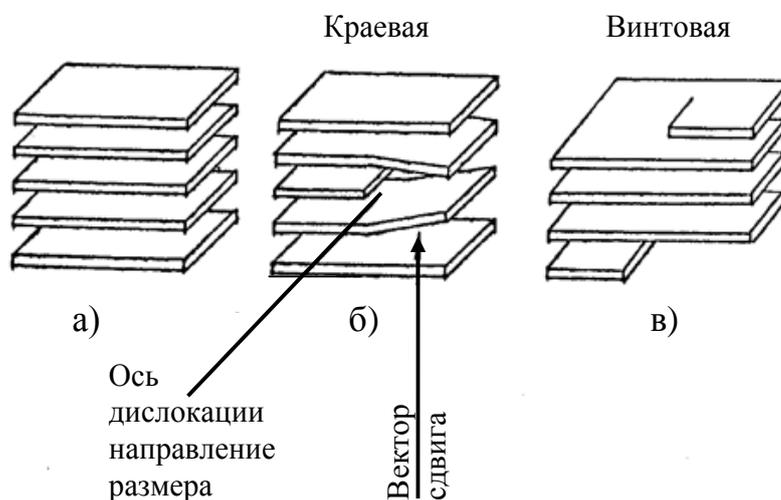


Рисунок 1.8 - Схемы дислокаций: б) краевая; в) винтовая ; а) без дефектов

Поверхностными называются дефекты, распространяющиеся на значительное расстояние в двух направлениях. Они бывают внутренние и наружные. Внутренние – это, прежде всего границы между зёрнами и их блоками [16].

Межзёрные прослойки металла имеют разрыхленное строение, атомы расположены неправильно, силы их сцепления значительно меньше, а энергия атомов увеличена. Диффузия в пограничных слоях зёрен в несколько раз больше, чем внутри кристаллической решетки зёрна. Поэтому атомы примесей особенно интенсивно накапливаются у границ зёрен, образуя межзёрную прослойку. В сильно наклепанном металле у границ зёрен возможно скопление значительного количества трещин [17]. Границы зёрен являются слабым местом структуры, по ним происходит скольжение, а в ряде случаев и отрыв металла. Толщина межзёрной прослойки колеблется от 5 до 20 межатомных расстояний. Количественно меньшая, но качественно аналогичная картина

имеется на границе, так называемой тонкой структуры, т.е. между блоками зерна (разориентировка которых не превышает одного градуса), называемых блоками мозаики (рисунок 1.9,а), а также на границе двойникования (рисунок 1.9,б), когда две половины кристалла (зерна) зеркально сдвигаются друг относительно друга.

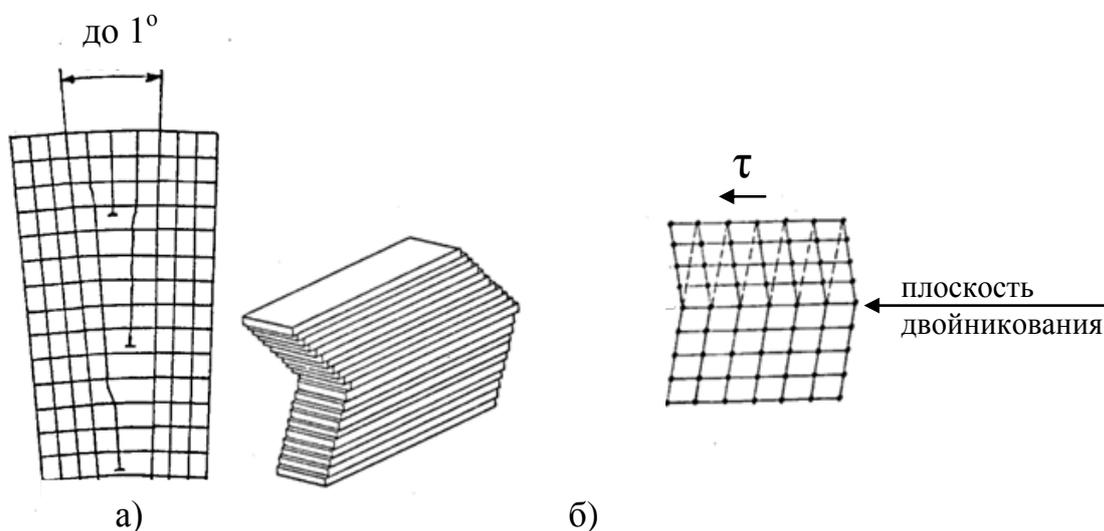


Рисунок 1.9 - Поверхностные дефекты кристаллов в виде тонкой микроструктуры, а) блоки мозаики, б) двойникование

Любая поверхность обладает энергией. Энергия зерна, сориентированного по различному от других зерен, больше энергии такого же количества материала, находящегося внутри кристалла с правильной решеткой. Энергия детали, ограниченной ее (открытыми) поверхностями, больше энергии такого же количества металла с той же зернистой и кристаллической структурой, но находящейся внутри массы металла. На образование любого рода поверхности должна затрачиваться энергия. Поверхностная энергия металлов составляет $1 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-2}$.

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 [18].

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 [19].

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

1.2. Физическая сущность упрочнения металла наклепом

На рисунке 1.10 условно показано влияние количество дефектов n кристаллической решетки на прочность металлов [7]. Как видно, с увеличением дефектов прочность вначале резко снижается. При увеличении дефектов кристаллической решетки нарушаются межатомные связи, уменьшается одновременное участие атомов в сопротивлении деформации. Отрезок a_0 представляет теоретическую прочность кристалла без дефектов. Отрезок $\sigma_n = 0$ 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.

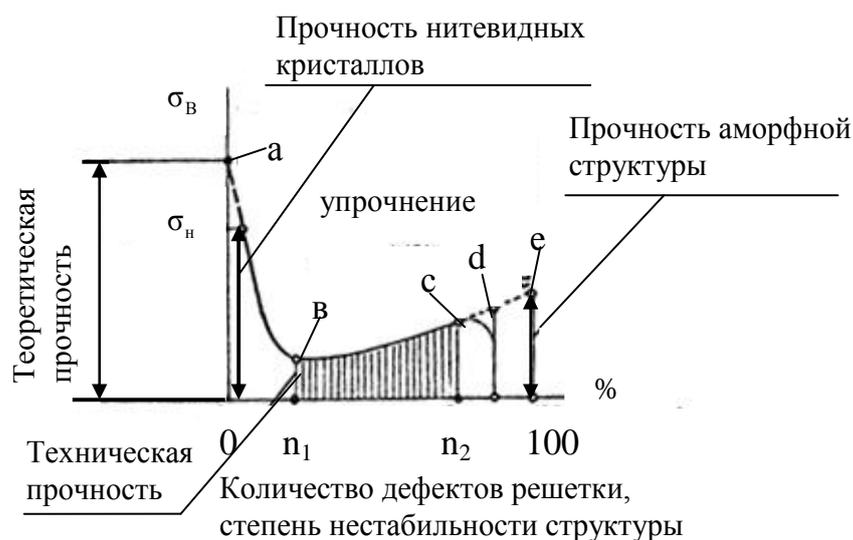


Рисунок 1.10 - Влияние количества дефектов n кристаллической решетки на прочность металлов

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.

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 [20].

Наклеп может повысить твердость и предел прочности в 1,5-3 раза, а предел текучести в 3-7 раз. Металлы с ГЦК - решеткой упрочняются сильнее, чем с ОЦК.

С ростом степени деформации уменьшается плотность металла, коррозионная стойкость, магнитная проницаемость, остаточная индукция, возрастает удельное электросопротивление и коэрцитивная сила (напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного металла) [16].

Барьером для движения дислокаций в металлах является также межзеренная граница. 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 [21], что дополнительно увеличивает остаточные напряжения сжатия.

1.3. Виды и причины статочных 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 [22]. 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) уравниваются в объемах, соизмеримых с размерами детали, они имеют ориентацию, связанную с конфигурацией детали.

Остаточные напряжения второго рода (микронапряжения) уравниваются 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 чугуне, 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 [23].

Остаточные напряжения третьего рода уравниваются 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 [24]. 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 [25].

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, обработке резанием, обработке давлением и других [26].

Остаточные напряжения иногда достигают значений предела прочности и конструкции разрушаются без внешних нагрузок. Например, без всякой внешней нагрузки двенадцатиметровая двутавровая балка из высокопрочной стали треснула по стенке на всю длину с шумом, напоминающим взрыв. В 1938 г. в Рюдерсдорфе мост рухнул в воду, когда на нем не было никакого груза. В

1940 г. в г. Дальята в строящемся на стапеле сварном зенкере образовалась поперечная трещина длиной несколько метров. В 1943 г. стоящий у причала в спокойной воде танкер «Скенектеди» разломился пополам [27].

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 [28].

При термической обработке неравномерность нагрева и остывания обычно бывает меньшей, чем при выше описанных 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 [29].

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 [30].

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 [31, 32].

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. Например, при шлифовании (особенно при образовании прижогов) гораздо чаще тепловое воздействие является превалирующим, что по выше описанной причине приводит к поверхностным остаточным растягивающим напряжениям [33].

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.

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 [34].

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 [35]. 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 [36].

1.4. Технологические методы упрочнения поверхностного слоя деталей

1.4.1. Гидродробеструйное упрочнение

Сущность гидродробеструйного (ГДС) 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 [37].

Основными преимуществами ГДС метода упрочнения являются: сохранение сравнительно низкой шероховатости поверхности ($R = 1,25-0,16$

мкм); улучшение микрогеометрии, так как увеличиваются радиусы закругления впадин и выступов и т.д.

Для осуществления этого способа разработаны гидродробеструйные эжекторные установки (рисунок 1.11), которые нашли широкое распространение. Обрабатываемая деталь 1 устанавливается на шпинделе в камере 2, разделенной сеткой 3 на полости А и Б. В сетке 3 помещены шарики, в полости Б- смазывающе-охлаждающая жидкость. В полости А располагается сопло-эжектор 4 (от одного до нескольких штук). В него насосом подается струя смазывающе-охлаждающая жидкость, которая подхватывает шарики и направляет их на обрабатываемую деталь. Разделительная сетка в создает полость для размещения шариков и обеспечивает непрерывное их отделение от рабочей жидкости [38].

При ГДС 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.

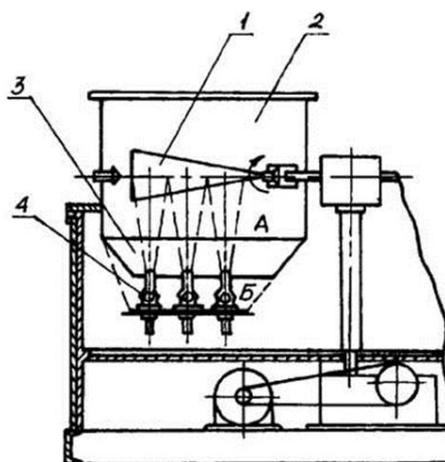


Рисунок 1.11 – Схема камеры гидродробеструйной установки

Технологические параметры, характеризующие процесс гидродробеструйное упрочнение, можно условно разделить на два вида: постоянные и изменяемые. Постоянными считаются те параметры, которые зависят от конструкции установки, применяемых шариков и смазывающе-охлаждающей жидкости. К ним относятся: размеры сопла-эжектора; расстояние от среза сопла до оси вращения детали; инструмент - шарики (материал, размеры) и их количество в камере; рабочая среда - смазывающе-охлаждающая жидкость; расход дробы через каждое сопло.

Изменяемыми параметрами являются давление жидкости, время упрочнения детали и относительное положение сопел и детали.

1.4.2. Пневмодробебетное упрочнение

Упрочнение сухой дробью в основном осуществляется на дробеструйных и дробебетных установках. В первом типе установок дробы 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 (ПДМ) упрочнения сухой дробью относится простота конструкции при использовании имеющейся на предприятиях централизованной системы подачи сжатого воздуха; концентрированный поток дробы, позволяющий обрабатывать труднодоступные участки деталей; возможность получения высоких скоростей полета дробы и др.

Недостатками ПДМ 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 [40].

На рисунке 1.12 представлена схема универсальной дробеметной установки.

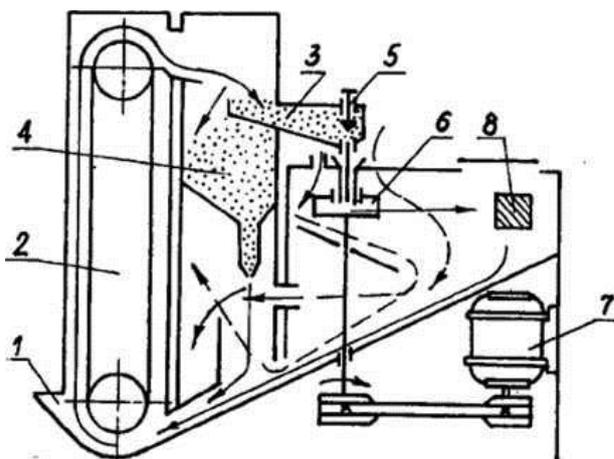


Рисунок 1.12 - Схема универсальной дробеметной установки

Дробеметная установка работает следующим образом. Подготовленную к заправке дробь засыпают в бункер 1, из которого элеватором 2 она поднимается в загрузочный бункер 3. При его заполнении избыток дроба поступает в бункер 4, который рассчитан на размещение всей дроба, находящейся в установке. При открытии питателя 5 дробь по вертикальному трубопроводу поступает к центру быстро вращающегося ротора 6, который закреплен на вертикальном валу и приводится в движение специальным электродвигателем 7. При вращении ротора дробь отбрасывается на обрабатываемую поверхность детали 8. Для вращения заготовок вовремя об работки установка снабжена специальными приспособлениями. После обработки дробь скатывается к приемной части элеватора и вновь поступает в загрузочный бункер.

В качестве инструмента при ПДМ упрочнении обычно используется стальная литая дробь размером 0,5-1,0 мм или 1,0 -1,4 мм.

При выборе режимов упрочнения следует иметь в виду, что на качество обработки оказывают влияние следующие технологические факторы: скорость дроба при встрече с обрабатываемой поверхностью; размер, качество и расход дроба; продолжительность обработки; направление потока дроба (угол атаки); обрабатываемый материал [41].

1.4.3. 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 ($R \leq 0,1$ мм), канавками, проточками, лабиринтными уплотнениями, а также для деталей с резьбами. Использование микро шариков 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.

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 [42].

В авиационном двигателестроении нашли применение многопозиционные установки. В этих установках имеется один дробемет, который направляет поток микро шариков, находящихся под действием центробежных сил, на поверхности упрочняемых деталей. Параметрами, которые определяют эффективность наклепа микро шариками являются: диаметр микро шариков, скорость полета и расход микро шариков, продолжительность наклепа и другие.

В промышленности применяют микрошарики нескольких градаций (мкм): до 63, 63-100, 100-160, 100-200. 160-200 и другие.

Принцип работы установки упрочнения микро шариками заключается в следующем (рис. 1.13). При подаче микрошариков из бункера во вращающийся дробемет они под действием центробежных сил выбрасываются на поверхность

деталей, закрепленных в кассетах.

Отраженные от деталей и защитного экрана микрошарики под действием силы тяжести по наклонному дну попадают к транспортирующему эжекторному соплу, а оттуда потоком воздуха возвращаются в бункер.

Сопротивление усталости деталей машин в значительной степени определяется микрогеометрией их поверхности. Наличие на поверхности детали, работающей в условиях знакопеременных нагрузок, отдельных дефектов и шероховатостей способствует концентрации напряжений. Поэтому назначение режимов упрочнения деталей микро шариками должно определяться, по мнению авторов метода, формированием и обеспечением микрогеометрии с заданной высотой микронеровностей и оптимальной величиной радиуса закругления дна впадины.

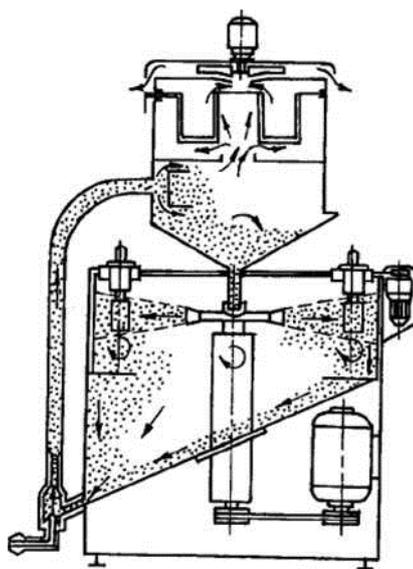


Рисунок 1.12 - Схема установки упрочнения микрошариками

1.4.4. 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 [43].

Вследствие проскальзывания частиц рабочей среды по поверхностям деталей и микро ударов по ним происходит съём 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 $R = 1,25-0,63$ мкм; виброполирование, характеризуемое незначительным съемом металла с обрабатываемой поверхности и шероховатостью от $R = 0,63$ мкм до $R = 0,16$ мкм; виброупрочнение, отличительной особенностью которого является применение в качестве частиц рабочей среды стальных полированных шариков или других тел с большой массой. Режим вибраций в этом случае предусматривает обеспечение пластического деформирования поверхностных слоев виброобрабатываемых деталей, их наклепа и создание в поверхностных слоях остаточных напряжений сжатия. Стальные полированные шарики при пластическом деформировании улучшают шероховатость обработанной поверхности с $R = 1,25$ мкм до $R = 0,63-0,32$ мкм.

Виброгалтовка осуществляется на специальных установках (рис. 1.13). Рабочий стол установки, упруго соединенный со станиной, может совершать колебательные движения в пространстве в одном, двух и трех направлениях. Детали закладываются в контейнер, закрепляемый на рабочем столе установки.

Сюда же загружают рабочую смесь - стальные или фарфоровые шарики и промывочно-охлаждающую жидкость.

На одной и той же вибрационной установке можно производить обработку деталей различными способами в зависимости от состава рабочих тел, количества рабочей жидкости в контейнере и расположения обрабатываемых деталей.

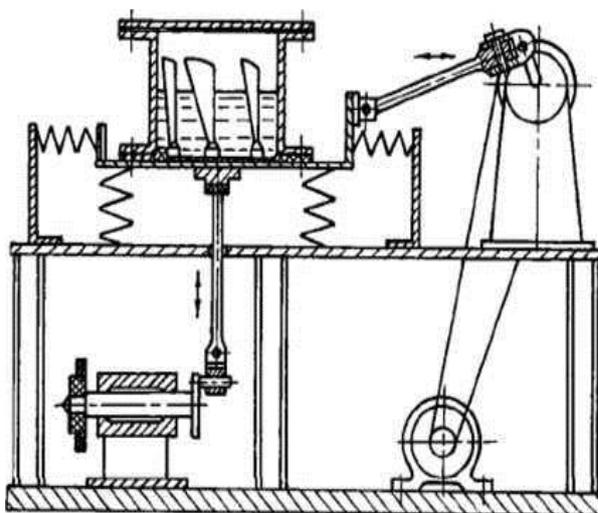


Рисунок 1.13 – Схема вибрационной установки

Исследованиями установлено, что объемная вибрационная обработка позволяет уменьшить шероховатость обрабатываемых поверхностей, сформировать в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия, механизировать ручной труд и снизить трудоемкость слесарной обработки.

1.4.5. Обработка методом обкатывания

Обработка методом обкатывания (ОМО) 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 ОМО деталь вращается, а деформирующий инструмент (шар), находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью, вместе с обкатным

приспособлением имеет продольную подачу (рисунок 1.14). Благодаря самоустанавливаемости шара во время ОМО 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 ОМО рекомендуется проводить с применением смазывающе охлаждающей жидкости, для чего используют индустриальное масло [36].. При смазке снижается коэффициент трения, температура контактных поверхностей становится ниже, что способствует получению более высокого класса шероховатости поверхности .

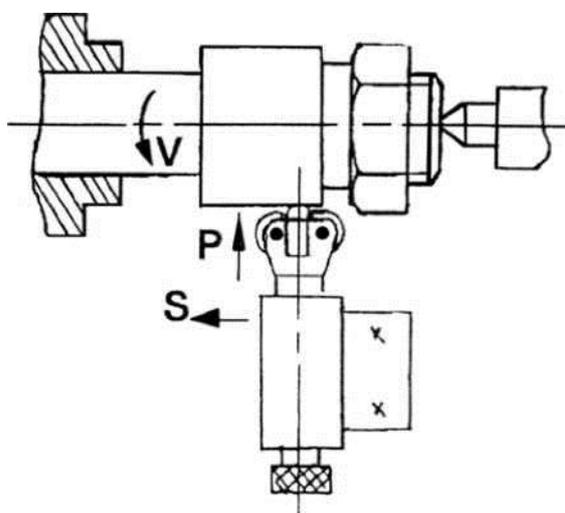


Рисунок 1.14 - Схема обкатывания шариком

При ОМО 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 ;

б. скорость обработки v .

ОМО 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.

1.4.6. 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 [44].

Схема образования остаточных напряжений по сечению детали представлена на рисунке 1.15. 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.

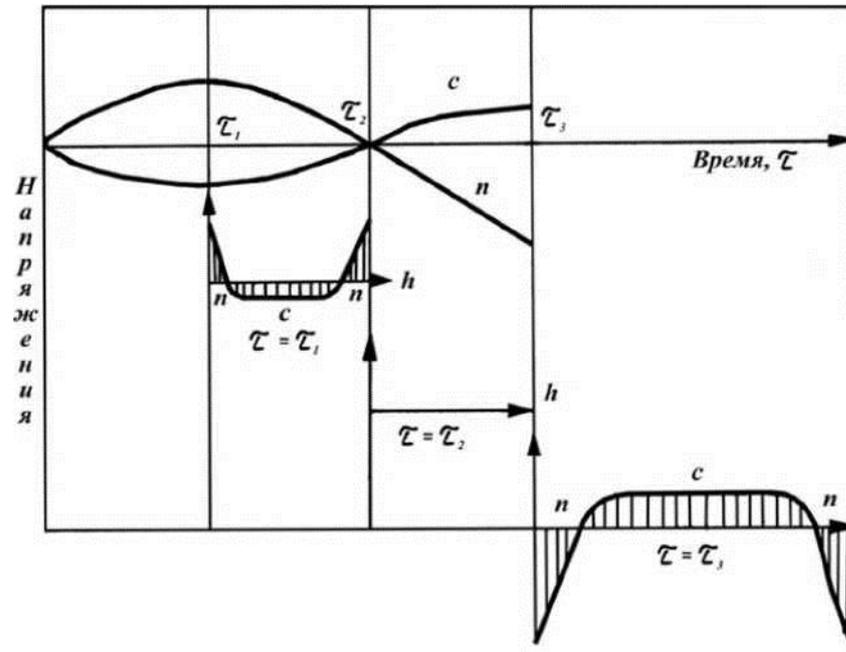


Рисунок 1.15 - Схема образования остаточных напряжений при термопластическом упрочнении: *a* - изменение температурных напряжений при охлаждении детали (*n* - поверхность, *c* - сердцевина); *б* - распределение температурных напряжений по сечению детали *h* в разные моменты времени

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 ППД, 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.

Прочность металла можно повысить, если после нагрева выше температуры плавления охладить его с очень большой скоростью (10^4 град/с и более) [44]. При этом металл не успевает кристаллизоваться, он затвердевает, а атомы остаются примерно в том же хаотичном расположении, в котором они были в жидком металле, т.е. в аморфном состоянии. Это состояние на диаграмме рисунка 1.10 для наглядности условно принято за 100%-ное количество дефектов кристаллической решетки (или же степени

нестабильности структуры), так как при этом кристаллической решетки, как таковой нет, а структурное состояние является предельным.

Аморфные сплавы (их также называют металлическими стеклами) представляют нестабильную структуру сильно пересыщенных твердых растворов большей частью двух-трех или четырех компонентов металла с неметаллом, металла с двумя неметаллами, двух металлов и двух неметаллов с концентрацией, значительно превышающей максимальную равновесную концентрацию. Физико-химическая основа образования аморфной структуры - большое различие в атомных радиусах компонентов и прочность их химических связей.

Ввиду необычного атомного строения и электронной структуры аморфные сплавы обладают свойствами, значительно отличающимися по величине и сочетанию от свойств сплавов с кристаллической структурой. Магнитные, механические, электросопротивление и коррозионная стойкость их значительно выше сплавов с кристаллической структурой. Причем магнитные свойства почти не чувствительны к механическим воздействиям. Они обладают высокими пределом точности (200-340 кгс/мм) и твердостью (HV710-980) [12].

Высокие прочностные свойства аморфных сплавов обусловлены монолитностью структуры, т.е. отсутствием границ зерен, по которым обычно происходит разрушение. Их можно еще больше упрочнить путем создания в них небольшого количества кристаллической фазы, создающей торможение течению металла. Аморфные сплавы обладают значительно более высокой коррозионной стойкостью, чем кристаллические металлы. Например скорость коррозии кристаллического сплава железа с 4-мя % хрома в растворе поваренной соли в 13 раз больше (0,65 мм/год), чем аналогичного аморфного сплава железа с хромом, фосфором и углеродом (0,05 мм/год). Это, по-видимому, также в значительной степени объясняется отсутствием границ зерен, дислокаций и других подобных дефектов, обычно являющихся очагами коррозионного разрушения

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

1. В настоящее время отсутствуют результаты исследований влияния условий обработки, параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и упрочнение поверхности отверстий обработанных стандартными быстрорежущими спиральными сверлами.

2. Отсутствуют математические зависимости, раскрывающие влияние режимов обработки сверлением на глубину дефектного поверхностного слоя и упрочнение поверхности просверленных отверстий.

3. Отсутствуют технологические методы упрочнения поверхности отверстий малых диаметров значительной глубины.

4. Отсутствует методология планирования, организации и проведения исследований объектом которых является качество поверхностного слоя и упрочнение поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

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

1. Определить условия обработки сверлением, при которых имеет место влияние параметров режима резаний на глубину дефектного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

2. Определить характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

3. Разработать эмпирическую модель влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

4. Разработать методологию планирования, организации и проведения исследований объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

ГЛАВА 2. МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются технологические процессы обработки отверстий, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости.

Предметом исследований являются технологические переходы обработки отверстий быстрорежущими спиральными сверлами, обеспечивающие снижение глубины дефектного поверхностного слоя при одновременном упрочнении поверхности отверстий с целью повышения долговечности и качества изделий машиностроения и значительного снижения трудоемкости их изготовления.

Методы проведения любых исследований процесса изготовления деталей включают требования к технологической системе, состоящей из четырех обязательных составляющих:

- станок (технологическое оборудование, на котором производится обработка деталей или изготовление изделия);
- приспособление (технологическое оснащение оборудования, необходимое для обеспечения обработки деталей или изготовления изделия);
- инструмент (режущий, или любой другой, непосредственно участвующий в обработке деталей или изготовлении изделия);
- деталь (конструктивная часть изделия или изделие в целом, непосредственно подлежащее обработке).

2.1. Станок

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 (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 - Широкоуниверсальный фрезерный станок повышенной точности модели 675П

В сравнении с вертикально-сверлильным станком модели 2Н125П станок 675П имеет 16 скоростей резания и 16 подач, против 12 скоростей резания и 9 подач станка 2Н125П, и достаточно узкий диапазон их варьирования (табл. 2.1).

В таблице 2.2 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 - Технические характеристики фрезерного универсального станка 675П

Размеры рабочей поверхности вертикального стола (основного)	200 x 500 мм
Размеры рабочей поверхности углового горизонтального стола	200 x 630 мм
Расстояние от оси горизонтального шпинделя до поверхности углового стола	55..355 мм
Расстояние от торца вертикального шпинделя до поверхности углового стола	0..280 мм
Наибольший продольный ход стола (X)	320 мм
Наибольший вертикальный ход стола (Z)	300 мм
Наибольший поперечный ход шпиндельной бабки (Y)	200 мм
Конец шпинделя	конус Морзе 4
Пределы частот вращения горизонтального шпинделя	50..1630 об/мин
Пределы частот вращения вертикального шпинделя	63..2040 об/мин
Электродвигатель привода шпинделя	1,7 кВт; 1420 об/мин
Вес станка	635 кг

Таблица 2.2 – 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

2.2. Приспособление

При проведении экспериментальных исследований приспособление должно обеспечивать точность позиционирования заготовки, а именно параллельность технологических баз относительно рабочей поверхности стола станка и их перпендикулярность относительно оси сверла. При проведении исследований заготовка непосредственно устанавливалась на столе станка (рисунок 2.2), тем самым погрешности позиционирования заготовки полностью исключались.



Рисунок 2.2 – Установка обрабатываемой заготовки непосредственно на столе станка

2.3. Инструмент

При проведении экспериментальных исследований использовались спиральные сверла с коническим хвостовиком (рисунок 2.3) по ГОСТ [45], диаметром 11 мм из быстрорежущей стали Р6М5, повышенной точности класса А1 (рисунок 2.3а), нормальной точности классов В1 (рисунок 2.3б) и В (рисунок 2.3в). Сверла повышенной точности затачивались по двухплоскостной заточке.



а) б) в)

Рисунок 2.3 – Сверла спиральные с коническим хвостовиком из быстрорежущей стали Р6М5

Конструктивные элементы и геометрические параметры контролировались на соответствие стандартам [45,46,47] на микроскопе УИМ-23, (рисунок 2.4). Методы и средства измерений отражены в источниках [48-53].

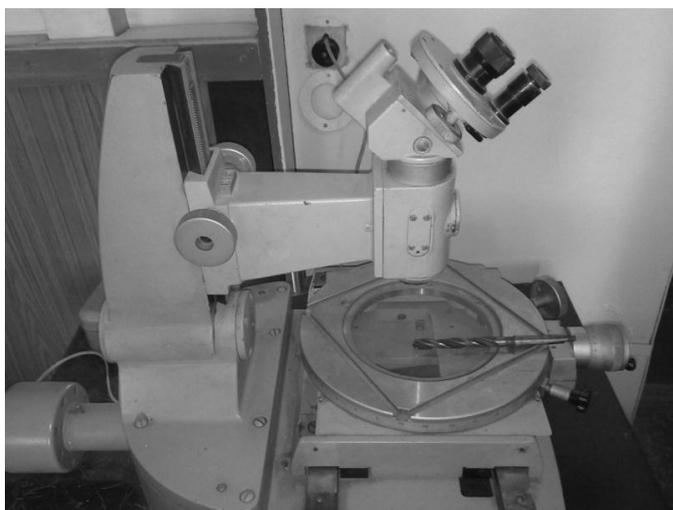


Рисунок 2.4 - Микроскоп УИМ-23

Технические характеристики микроскопа УИМ-23 представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 - Технические характеристики микроскоп УИМ-23

Пределы измерения длин:	
— в продольном направлении	0-200 мм
— в поперечном направлении	0-100 мм
Пределы измерения углов	0-360°
Пределы измерения диаметров отверстий при применении приспособления типа перффлектометра для измерения отверстий бесконтактным методом	0,2-40 мм
Наибольшая глубина измеряемых отверстий	40 мм
Цена деления:	
— линейных шкал	1 мм
— лимба штриховой угломерной головки	1°
— шкал оптического микрометра	0,001 мм
— минутной шкалы штриховой угломерной головки	1'
Наибольшее расстояние между центрами	700 мм
Наибольшая масса измеряемого изделия	10 кг

Для лабораторных исследований отбирались сверла с одинаковыми геометрическими параметрами и размерами конструктивных элементов. Геометрические параметры и размеры конструктивных элементов сверл, отобранных для лабораторных исследований, представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Геометрические параметры и конструктивные элементы сверл

D, мм	L, мм	l, мм	2φ°	α°	α ₁ °	ω°	ψ°	B, мм	K, мм	f, мм	q, мм	обратная конусность
11,0	168	87	118	12	30	28	55	6,0	1,52	1,0	9,4	0,08

После установки в шпиндель танка контролировалось осевое биение режущих кромок сверл микрометром часового типа (рис. 2.5), установленном на магнитном штативе непосредственно на рабочем столе станка.



Рисунок 2.5 – Микрометр часового типа на магнитном штативе

У сверл повышенной точности класса А1 осевое биение после установки в шпиндель станка не превышало значение 0,08 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.

2.5. Деталь

Сверлились заготовки из конструкционной стали Ст45 180НВ. Толщина заготовок соответствовала трем диаметрам сверл. Сверлились сквозные отверстия (рисунок 2.6) с поливом смазочно-охлаждающей жидкостью – 5% раствор Укринола 1.

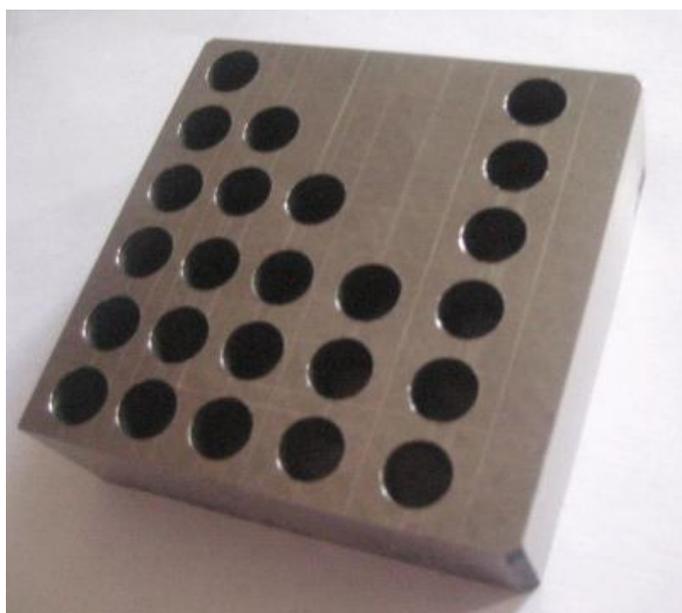


Рисунок 2.6 – Заготовка

Предварительно заготовки фрезеровались и шлифовались с шести сторон для обеспечения установочных и контрольных технологических баз.

2.6. Методы контроля качества просверленных отверстий

2.6.1. Квалитет допуска

Контролировался диаметр просверленных отверстий в трех сечениях и двух взаимно перпендикулярных плоскостях нутромером (рис. 2.7)



Рисунок 2.7 – Контроль квалитета допуска

Использовался нутромер индикаторный НИ-10-18-1 [54] (рисунок 2.8), предварительно настроенный на рабочий диаметр сверла микрометром [55] (рисунок 2.9)



Рисунок 2.8 – Нутромер индикаторный НИ-10-18-1, 10 – 18 мм



Рисунок 2.9 – Микрометр типа МКО – 25 мм

2.6.2. Методы контроля качества поверхностного слоя просверленных отверстий

Качество поверхностного слоя просверленных отверстий характеризуется двумя показателями: глубиной дефектного поверхностного слоя и упрочнением поверхности отверстий.

2.6.2.1. Глубина дефектного поверхностного слоя

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 полировочной установке «PRESI Mintech 233», (рис. 2.10), с применением наждачной бумаги зернистостью от Р 60 (номер зерна 250..315 мкм) до Р 180 (номер зерна 63..80 мкм) последовательно уменьшая размер зерна. Обработку производят на 5 номерах наждачной бумаги.

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 2.10 - Полировочная установка « PRESI Mintech 233»

Технические характеристики полировочной установкой «PRESI Mintech 233» представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 - Технические характеристики полировочная установка « PRESI Mintech 233»

Шлифовальный круг (Mintech 233)	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 полировочной установке «PRESI Mintech 233», (рисунок 2.10). Обработку производят на 4 номерах наждачной бумаги последовательно уменьшая размер зерна: Р 240 (номер зерна

50..63 мкм), Р 280 (номер зерна 40..50мкм), Р 400 (номер зерна 28..40мкм), Р 600 (номер зерна 20..28 мкм). При смене зернистости наждачной бумаги направление вращения наждачного круга изменяется на противоположное.

Полировка также осуществляется на полировочной установке «PRESI Mintech 233». Полировка удаляет оставшиеся после шлифования мелкие дефекты поверхности, риски и т.п. Для полировки используется абразив в виде суспензии или пасты, который наносят на подкладку специальной ткани, прикрепленной к шлифовальному кругу установки (рисунок 2.11).



Рисунок 2.11 - Полировочная установка « PRESI Mintech 233»

В качестве абразивов применяют порошки окиси хрома, окиси магния, окиси алюминия и алмаз. 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.

Травление стали производится 4% раствором азотной кислоты в этиловом спирте (рисунок 2.12).

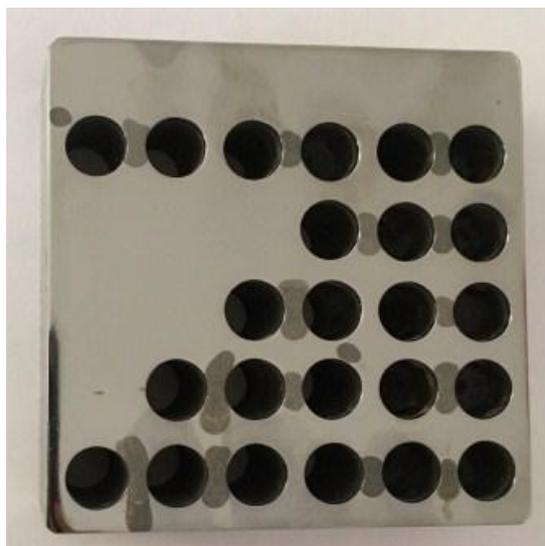


Рисунок 2.12 - Заготовка после травления

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 и 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 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 сплавов.

Микроструктура поверхностного слоя отверстий изучалась на световом микроскопе Axio Imager A1m/M1m (рисунок 2.11) при 200 кратном увеличении.



Рисунок 2.11 - Световой микроскоп Axio Imager A1m/M1m

Основные технические характеристики светового микроскопа Axio Imager A1m/M1m представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 - 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

2.6.4.2. Контроль упрочнения поверхностного слоя отверстий

Справочник [56] 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% [56]. Степень наклепа справочником [56] 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 [57] 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 2.12). 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 2.12 – Измерение твердости обработанной сверлением поверхности

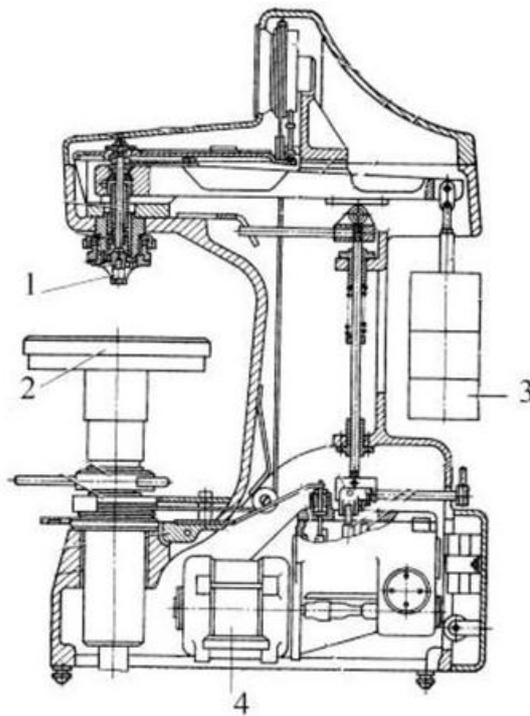


Рисунок 2.13 – Схема твердомера Роквелла 1 – оправка с индентором, 2 – предметный столик, 3 – грузы, 4 – электродвигатель

Технические характеристики твердомера Роквелла представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 - 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
Масса, кг, не более	65

2.7. Методы статистического анализа экспериментальных данных

2.7.1. Методы корреляционно-регрессионного анализа

Если связь между случайными переменными величинами выражена не явно, то сначала необходимо определить наличие и тесноту связи между ними, а затем, при достаточно тесной связи, приступить к решению следующей задачи корреляционного анализа – определение уравнения регрессии и расчета его параметров.

В этом случае задача корреляционного анализа, прежде всего, заключается в определении коэффициента корреляции и его значимости.

Цель корреляционного анализа — получение информации об одной случайной переменной с помощью другой случайной переменной. Это возможно, если связь между исследуемыми величинами существует. В самом общем виде принятие гипотезы о наличии корреляционной связи означает, что

изменение значения одной случайной переменной x произойдет одновременно с изменением значения другой случайной переменной y . 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 [58].

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, для правомочности применения которого предварительно необходимо убедиться, что распределение сравниваемых случайных переменных нормальное, т.е. подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

2.7.2. 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 [59] 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}

$$\bar{d} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|}{nS^*} \quad (2.1)$$

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

$$S^* = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}. \quad (2.2)$$

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 2.8 по числу результатов наблюдений n , $\frac{q_1}{2}$ и $(1 - \frac{q_1}{2})$, причем q_1 заранее выбранный уровень значимости критерия (табл. 2.8).

Таблица 2.8 - Статистика d

n	$\frac{q_1}{2} \ 100\%$		$(1 - \frac{q_1}{2}) \ 100\%$	
	1%	5%	95%	99%
16	0,9137	0,8884	0,7236	0,6829
21	0,9001	0,8768	0,7304	0,6950

Критерий 2

Можно считать, что результаты наблюдений 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:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (2.3)$$

где, $z_{P/2}$ – верхний квантиль распределения нормальной функции Лапласа, отвечающей вероятности $P/2$. Значение P определяется по таблице 2.9 по выбранному уровню значимости q_2 и числу результатов наблюдений n .

При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице 2.9, значение P находят путем линейной интерполяции.

Таблица 2.9 - 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

Зависимость $Z_{P/2}$ от P приведена в таблице 2.10. При уровне значимости, отличном от предусмотренных в таблице 2.9 значение P находят путем линейной интерполяции. При несоблюдении хотя бы одного из критериев считают, что распределение результатов измерений группы не соответствует нормальному.

Таблица 2.10 – 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

Если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считают, что распределение результатов наблюдений группы не соответствует нормальному.

2.7.3 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 2.11.

Таблица 2.11 - 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

$$r = \frac{\sum(y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2 \sum(x_i - \bar{x})^2}} \quad (2.4)$$

Теснота связи случайных переменных величин определяется по уровню значимости коэффициента корреляции по таблице 2.12 в зависимости от числа степеней свободы $k = n - 2$, где n – размер выборки.

Таблица 2.12 - 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
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

2.7.4. 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 2.13.

Таблица 2.13 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 таблице 2.13 занесли статистические результаты испытаний, для которых исследовали характер взаимозависимости, y – объект исследований, x – независимый переменный фактор.

Для определения коэффициентов регрессии линейной статистической зависимости в таблицы 2.13 заносятся фактические значения x и y . Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\Sigma (y_i + x_i)^2 = \Sigma x_i^2 + 2 \Sigma x_i y_i + \Sigma y_i^2. \quad (2,5)$$

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

$$b = \frac{n \Sigma x_i y_i - \Sigma x_i \Sigma y_i}{n \Sigma x_i^2 - (\Sigma x_i)^2}, \quad (2,6)$$

$$a = \frac{(\Sigma y_i - b \Sigma x_i)}{n}. \quad (2.7)$$

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}} \quad (2.8)$$

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. Погрешность расчетов определяется степенью совпадения рассчитанных значений с фактическими.

Для определения коэффициентов регрессии степенной статистической зависимости ($y = ax^b$) в таблицу 2.14 заносятся натуральные логарифмы значений x и y . Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\sum (\ln y_i + \ln x_i)^2 = \sum \ln x_i^2 + 2 \sum \ln x_i \ln y_i + \sum \ln y_i^2 \quad (2.9)$$

Таблица 2.14 - Исходные данные для определения коэффициентов уравнения регрессии степенной зависимости

N_0	$\ln y_i$	$\ln x_i$	$\ln y_i^2$	$\ln y_i \ln x_i$	$\ln x_i^2$	$\ln y_i + \ln x_i$	$(\ln y_i + \ln x_i)^2$
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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \sum \ln x_i \ln y_i - \sum \ln x_i \sum \ln y_i}{n \sum \ln x_i^2 - (\sum \ln x_i)^2} \quad (2.10)$$

$$\ln \alpha = \frac{(\sum \ln y_i - b \sum \ln x_i)}{n} \quad (2.11)$$

$$a = e^{\ln \alpha} \quad (2.12)$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum \ln x_i^2 - (\sum \ln x_i)^2}{n \sum \ln y_i^2 - (\sum \ln y_i)^2}} \quad (2.13)$$

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.

Для определения коэффициентов регрессии экспоненциальной статистической зависимости ($y = ae^{bx}$) в таблицу 2.15 заносятся натуральные логарифмы значений y и фактические значения x . Последние два столбца этой таблицы используются для проверки точности расчетов по формуле:

$$\sum (\ln y_i + x_i)^2 = \sum x_i^2 + 2 \sum x_i \ln y_i + \sum \ln y_i^2. \quad (2.14)$$

Таблица 2.15 - 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

$$\sum (\ln y_i + x_i)^2 = \sum x_i^2 + 2 \sum x_i \ln y_i + \sum \ln y_i^2. \quad (2.15)$$

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам

$$b = \frac{n \sum x_i \ln y_i - \sum x_i \sum \ln y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}, \quad (2.16)$$

$$\ln \alpha = \frac{(\sum \ln y_i - b \sum x_i)}{n}. \quad (2.17)$$

$$a = e^{\ln a} \quad (2.18)$$

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = b \sqrt{\frac{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}{n \sum \ln y_i^2 - (\sum \ln y_i)^2}} \quad (2.19)$$

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.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

Разработана методология постановки, проведения исследований и обработки их результатов включающая последовательное выполнение взаимосвязанных методов, способов исследований, состоящих из следующих этапов:

1. Выбор станка, обеспечивающего высокую точность обработки и необходимые параметры режима резания;
2. Подготовка технологических и измерительных баз обрабатываемой заготовки;
3. Двухплоскостную заточку режущей части сверл на прецизионном заточном оборудовании и контроль геометрических параметров, конструктивных элементов спиральных сверл и осевого биения режущих кромок, в том числе и при установке сверл в шпиндель станка;
4. Методы контроля глубины дефектного поверхностного слоя и упрочнения поверхностного слоя просверленных отверстий;
5. Методы корреляционно-регрессионного анализа результатов исследований.

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 0,25 – 0,15 мкм (табл.3.1) [56].

В табл.3.1 приведены ориентировочные показатели качества для различных методов обработки осевыми инструментами полученные систематизацией непосредственных наблюдений в производственных условиях [56].

Таблица 3.1 - Показатели качества при обработке отверстий осевыми инструментами

Обработка	Шероховатость поверхности R_a , мкм	Глубина дефектного поверхностного слоя, мкм	Квалитет допуска	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

В представленной таблице видно, что сверлением могут быть получены отверстия, показатели качества которых соответствуют нормальному развертыванию, а именно $Ra = 0,8$ мкм, квалитет допуска 9, технологический допуск на размер 43 мкм при номинальных диаметрах отверстий св. 10 до 18 мм. При этом сверление может обеспечить глубину дефектного поверхностного от 25 до 15 мкм (табл. 3.1). Такие показатели качества позволяют исключить технологические переходы рассверливание, черновое и чистовое зенкерования и нормальное развертывание и сразу после сверления выполнять точное и тонкое развертывание. Однако справочник [56] не содержит информации об условиях обработки сверлением деталей из конструкционных углеродистых сталей, позволяющих получить такие высокие показатели качества отверстий.

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 (180НВ) спиральными сверлами из быстрорежущей стали Р6М5 [60, 61].

На рисунке 3.1 представлена фотография микроструктуры металла поверхностного слоя отверстия

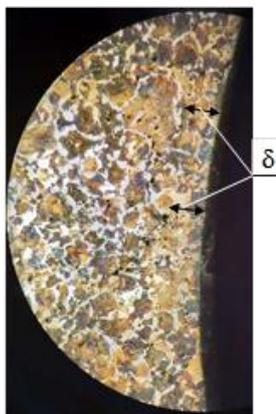


Рисунок 3.1 - Фотография микроструктуры металла поверхностного слоя отверстия, где δ - глубина дефектного поверхностного слоя отверстий.

Результаты анализа микроструктуры металла поверхностного слоя отверстий при сверлении сверлами нормальной точности класса В [62, 63, 64] представлены в таблице 3.2.

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

S , мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
V , м/мин						
	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

Сверла нормальной точности класса В, имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм. В таблице 3.2 видно, что связь между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий явно не выражена. Определить наличие и тесноту связи между ними позволяет коэффициент линейной корреляции Пирсона, для правомочности применения которого предварительно необходимо убедиться, что распределение сравниваемых результатов исследований нормальное, т.е. подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Методика проверки соответствия распределения закону Гаусса для выборок малого объема ($15 < n < 50$) регламентирована ГОСТ [59], согласно которой нормальность распределения проверяют при помощи составного критерия (критерий 1 и критерий 2). Если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считают, что распределение результатов исследований не соответствует нормальному.

Критерий 1

Вычисляют отношение \bar{d} используя зависимости (2.1) и (2.2), которое равно 0,7914

Результаты исследований можно считать распределенными нормально, если $0,7304 \leq 0,7914 \leq 0,8768$ (табл. 2.8).

Критерий 2

Можно считать, что результаты исследований принадлежат нормальному распределению, если не более 1 (табл. 2.10) разностей $|\delta_i - \bar{\delta}|$ превзошли значение $Z_{p/2}S$. $Z_{p/2} = 2,33$ (табл. 2.11), $S = 5,75$ (2.3), не одного значения $|\delta_i - \bar{\delta}|$ не превзошли $Z_{p/2}S = 13,3975$. Максимальное значение разности $|\delta_i - \bar{\delta}|$ равно 12,4.

Распределение глубин дефектного слоя можно считать нормальным.

Для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя заполняется таблица 2.12 которая на подаче $S = 0,25$ мм/об будет иметь вид (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя на подаче 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	49,6	2,18	-1,42	2,0164	-1,468	2,1550	2,08456
2	55,6	2,76	4,58	20,9764	-0,888	0,7885	-4,06704
3	50,0	3,45	-1,02	1,0404	-0,198	0,0392	0,20196
4	46,7	4,32	-4,32	18,6624	0,672	0,4516	-2,90304
5	53,2	5,53	2,18	4,7524	1,882	3,5419	4,10276
Σ				47,448	6,97628		-0,5808

Коэффициент корреляции рассчитывается по зависимости 2.4, которая будет иметь вид

$$r = \frac{\sum(\delta_i - \bar{\delta})(v_i - \bar{v})}{\sqrt{\sum(\delta_i - \bar{\delta})^2 \sum(v_i - \bar{v})^2}}. \quad (3.1)$$

Используя данные таблицы 3.3 для расчета коэффициента корреляции по зависимости 3.1 получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.1) коэффициент корреляции $r = -0,0324$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.4 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя на подаче $S = 0,2$ мм/об

Таблица 3.4 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя на подаче 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	66,7	2,18	7,06	49,8436	-1,468	2,1550	-10,36408
2	56,7	2,76	-2,94	8,6436	-0,888	0,7885	2,61072
3	53,3	3,45	-6,34	40,1956	-0,198	0,0392	1,25532
4	63,2	4,32	3,56	12,6736	0,672	0,4516	2,39232
5	58,3	5,53	-1,34	1,7956	1,882	3,5419	-2,52188
Σ				114,9476		6,97628	-6,6276

Используя данные таблицы 3.4 для расчета коэффициента корреляции по зависимости 3.1 получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.1) коэффициент корреляции $r = -0,234$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.5 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя на подаче $S = 0,16$ мм/об

Таблица 3.5 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и глубиной дефектного слоя на подаче 0,16 мм/об

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

Используя данные таблицы 3.5 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.1) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.1) коэффициент корреляции $r = -0,512$ не является значимым (табл. 2.12).

Таблица 3.6 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного 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
----------	--	--	--	---------	--	---------	--------

В таблице 3.6 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного слоя на скорости резания $V=5,53$ м/мин

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

$$r = \frac{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\Sigma(\delta_i - \bar{\delta})^2 \Sigma(s_i - \bar{s})^2}} \quad (3.2)$$

Используя данные таблицы 3.6 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.2) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.2) коэффициент корреляции $r = 0,616$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.7 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного слоя на скорости резания $V=4,32$ м/мин

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

Используя данные таблицы 3.7 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.2) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.2) коэффициент корреляции $r = -0,168$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.8 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного слоя на скорости резания $V = 3,45$ м/мин

Таблица 3.8 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и глубиной дефектного 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 таблицы 3.8 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.2) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.2) коэффициент корреляции $r = -0,439$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.9 представлены результаты проверки корреляции между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий обработанных сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм.

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

$S,$	связь V - δ	$V,$	связь S - δ
------	----------------------	------	----------------------

мм/об	<i>r</i>		м/мин	<i>r</i>	
0,16	-0,512	не значим	3,45	-0,439	не значим
0,2	-0,234	не значим	4,32	-0,168	не значим
0,25	-0,032	не значим	5,53	0,616	не значим

В таблице 3.9 видно отсутствие связи между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий обработанных сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм.

Аналогично проведен корреляционный анализ результатов исследований, представленных в таблице 3.10.

В таблице 3.10 представлена глубина дефектного поверхностного слоя отверстий при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм.

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

<i>S</i> , мм/об	0,078	0,1	0,13	0,16	0,20	0,25
<i>V</i> , м/мин						
	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	18,6	18,9	19,40

Как видно в таблице 3.10 скорость резания и подача влияют на глубину дефектного поверхностного слоя отверстий. Для определения степени этого влияния проведен корреляционный анализ.

В таблице 3.11 представлены результаты проверки корреляции между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий обработанных сверлами повышенной точности класса *A1* с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок не превышала 0,06 мм.

Таблица 3.11 - Корреляция между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий обработанных сверлами повышенной точности класса *A1* с двухплоскостной заточкой режущей части

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

В таблице 3.11 видно при работе сверлами повышенной точности класса *A1* с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, у которых осевое биение режущих кромок не превышало 0,06 мм, имеет место значимая связь между скоростью резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий на подачах 0,16, 0,2 и 0,25 мм/об. Значимая связь между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий имеет место лишь на скоростях резания 4,32 и 5,53 м/мин. Связь между подачей и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий на скорости резания 3,45 м/мин не значима.

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. показывает на наличие зависимости случайных переменных величин, но не вид этой зависимости [65].

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

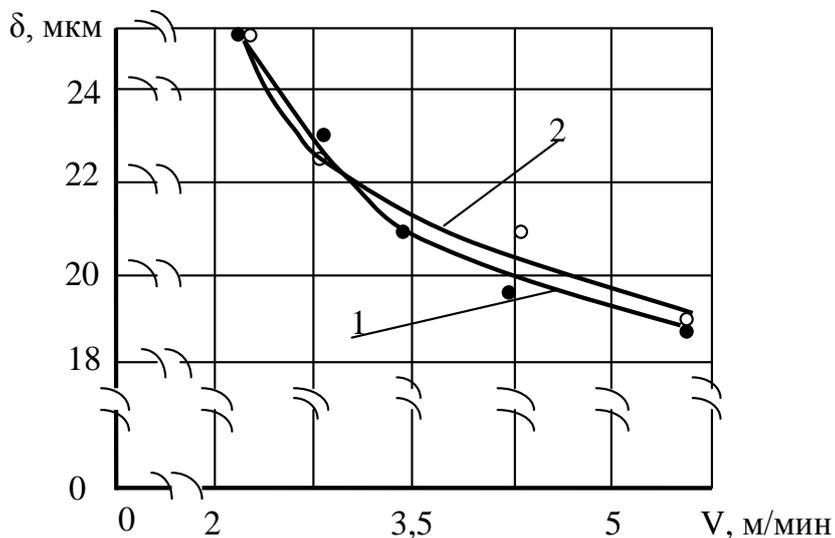


Рисунок 3.2 - Зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1: 1 – подача 0,2 мм/об, 2 – 0,25 мм/об.

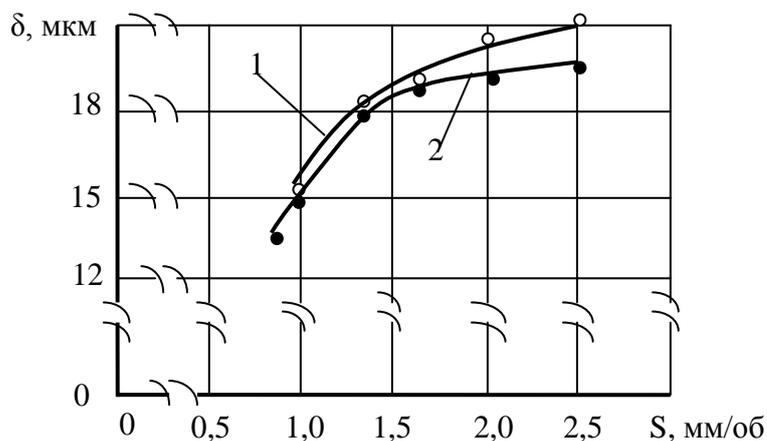


Рисунок 3.3 - Зависимость глубины дефектного поверхностного слоя от подачи при сверлении сверлами повышенной точности класса А1, 1 - $V = 4,32$ м/мин, 2 - $V = 5,53$ м/мин.

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). На рисунке 3.4 представлены зависимости разбивки отверстий от скорости резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 [66, 67].

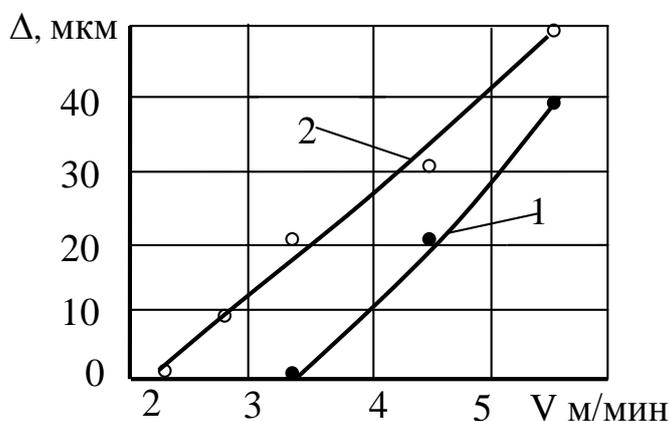


Рисунок 3.4 – Зависимость разбивки отверстий от скорости резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1: 1 – подача 0,2 мм/об, 2 – 0,25 мм/об

Характеры влияния скорости резания на разбивку просверленных отверстий (рисунок 3.4.) и на глубину дефектного поверхностного слоя (рисунок 3.2) при работе сверлами повышенной точности класса А1 различаются. 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).

3.2 Физические закономерности высокого качества отверстий полученных сверлением

Физические закономерности высокого качества отверстий, полученных сверлением, базируются на теории обработки металлов давлением, согласно

которой повышение температуры металла оказывает существенное влияние на его механические характеристики (рисунок 3.5) [68].

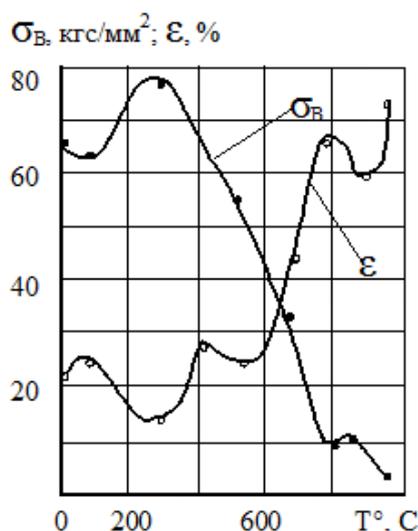


Рисунок 3.5 - Зависимость предела прочности и пластичности углеродистой конструкционной стали от температуры, где ϵ - степень деформации, характеризующая пластичность материала, σ_B – предел прочности

На рисунке 3.5 видно, что в области невысоких температур (до 100 $^{\circ}C$) с увеличением температуры пластичность углеродистой стали растет, а предел прочности уменьшается.

На рисунке 3.6 представлены результаты лабораторных исследований зависимости прочности углеродистой стали 45 от температуры [67]. Показателем прочности была принята твердость по Бринеллю (НВ), которая также может характеризовать пластичность материала. Известно, что чем выше твердость материала, тем ниже его пластичность, и наоборот.

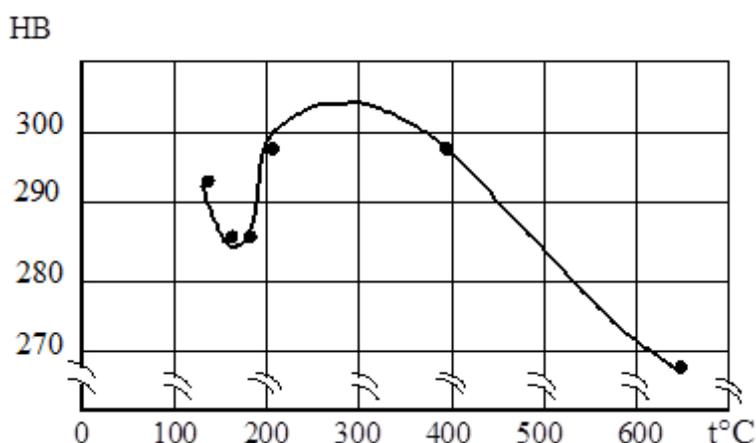


Рисунок 3.6 - Зависимость твердости (НВ) заготовки из стали 45 от температуры

При получении представленной зависимости (рисунок 3.6) заготовка нагревалась до температуры 650 °С, при остывании периодически измерялась ее твердость. Сравнение зависимостей предела прочности от температуры (рис. 3.5) и твердости от температуры (рисунок 3.6) показывает их аналогичный характер. Это дает основание предположить связь качества отверстий на скоростях резания меньших 6 м/мин с максимальной пластичностью металла в области невысоких температур.

Автор работы [69] представил экспериментально полученные зависимости пути резания от скорости резания и температуры (рисунок 3.7) позволяющие судить о температуре резания при тчении на низких скоростях резания, менее 0,1 м/с.

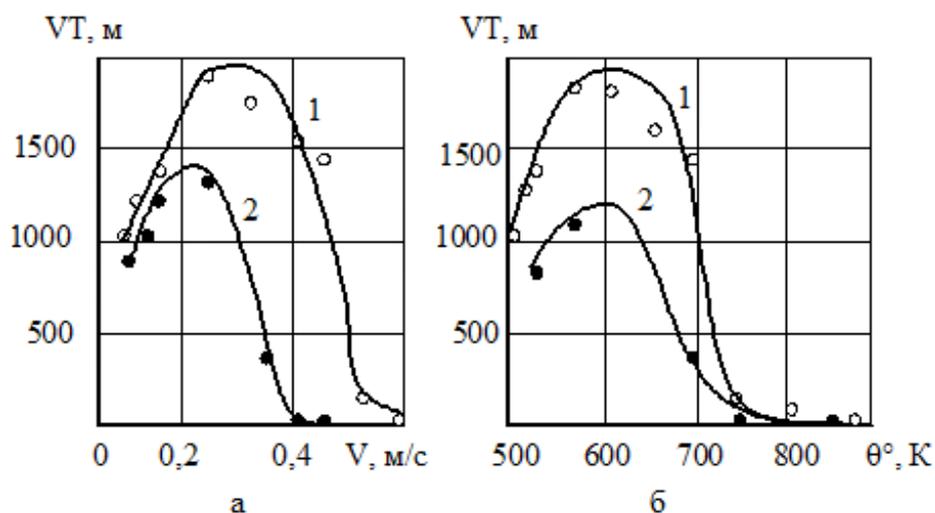


Рисунок 3.7 - Зависимости пути резания от скорости резания (а) и температуры резания (б) при тчении конструкционной углеродистой стали резцами из быстрорежущей стали, где 1 – толщина среза $\alpha = 0,1$ мм, 2 – $\alpha = 0,3$ мм

Анализ графиков представленных на рисунке 3.7 а и б показал, что на скоростях резания меньших 0,1 м/с температура резания примерно равна температуре максимальной пластичности металла на рисунке 3.5.

На основании изложенного выше можно предположить, что при сверлении на низких скоростях резания (менее 6 м/мин) физические закономерности уменьшения глубины дефектного поверхностного слоя отверстий с увеличением скорости резания связаны с характером влияния температуры резания на твердость конструкционной стали (рисунок 3.6). С увеличением скорости резания до 5,53 м/мин температура растет, а твердость уменьшается – левая ветвь кривой рисунка 3.6, что сопровождается повышением пластичности стали и уменьшением крутящего момента за счет чего глубина дефектного поверхностного слоя отверстий уменьшается.

Подача существенно и прямо пропорционально влияет на осевую силу и крутящий момент [70] поэтому и глубина дефектного поверхностного слоя (рисунок 3.3) и разбивка отверстий (рисунок 3.8) [67] увеличиваются с увеличением подачи.

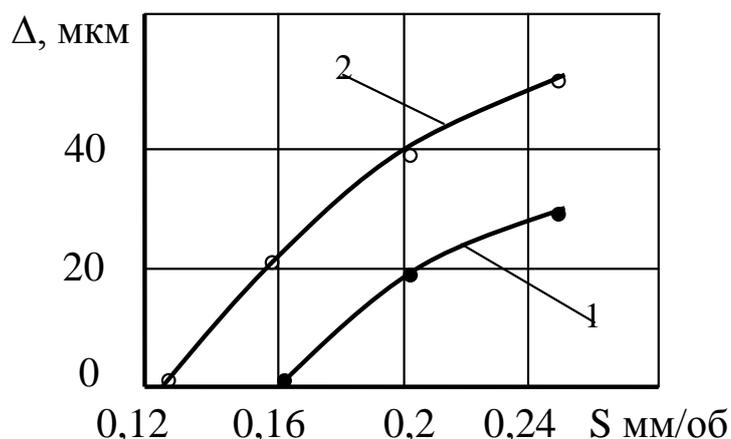


Рисунок 3.8 – Зависимость разбивки отверстий от подачи при сверлении сверлами повышенной точности класса А1: 1 – скорость резания 4,32 м/мин, 2 – 5,53 м/мин

Анализ результатов исследований, представленный выше показывает, что при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей на всех скоростях резания и подах глубина дефектного поверхностного слоя не превышает 0,25 мкм, что соответствует требованиям к качеству поверхности отверстий после нормального

развертывания [56], Этим обосновывается возможность значительного снижения трудоемкости обработки деталей с отверстиями высокой точности путем исключения из операции их обработки следующих технологических переходов: рассверливание, черновое и чистовое зенкерование, нормальное развертывание.

3.3. 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.

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

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.12.

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

Точности расчетов проверяется по формуле:

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

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

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

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

Линейная зависимость имеет вид:

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

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

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

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	42,7874642	17,313596	-26,638543		6,31981825
			1				

Точность расчетов проверяется по формуле:

$$\sum(\ln\delta_i + \ln S_i)^2 = \sum(\ln S_i)^2 + 2\sum \ln\delta_i \ln S_i + \sum(\ln\delta_i)^2 = 17,313596 - 2 \cdot 26,318797 + 42,78746421 = 6,31981825$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Степенная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается 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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

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

3.3.2 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 рассчитываются 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:

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

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент 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

№	$lh\delta_i$	lnV_i	$(ln\delta_i)^2$	$(lnV_i)^2$	$ln\delta_i \cdot lnV_i$	$ln\delta_i + lnV_i$	$(ln\delta_i + lnV_i)^2$
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:

$$\sum(\ln\delta_i + \ln V_i)^2 = \sum(\ln V_i)^2 + 2\sum \ln V_i \ln \delta_i + \sum(\ln \delta_i)^2 = 8,793259 + 2 \cdot 19,108967 + 46,018572 = 93,029765.$$

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

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

$$\ln a = \frac{\sum \ln \delta_i - b \sum \ln V_i}{n} = \frac{15,152 + 0,375 \cdot 6,385}{5} = 3,5093, \quad a = 31,3761.$$

Степенная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается 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 рассчитываются 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 рассчитывается 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 рисунок 3.1 и рисунок 3.2 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

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

Аппроксимация результатов исследований влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий, 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		
	δфакт., мкм	δ расч., мкм	погр., %	δфакт., мкм	δ 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		
	δфакт., 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

В таблице 3.19 и таблице 3.20 видно, что средняя погрешность расчетов во всех случаях не превысила значения 5%.

3.4.1. Методика разработки обобщенной эмпирической модели

Методика разработки обобщенной эмпирической зависимости заключается в определении постоянного коэффициента a зависимости (3.3) 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 зависимостью (3.5)

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

В результате применения настоящей методики получена эмпирическая модель для расчета глубины дефектного слоя просверленных отверстий при варьировании скоростью резания и подачей в виде

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

Проведен сравнительный анализ адекватности эмпирической модели (3.6) результатам настоящих исследований (табл. 3.22), который позволил определить фактические и рассчитанные глубины дефектного поверхностного слоя отверстий и погрешность расчетов.

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

V, м/мин	S = 0,2 мм/об			S = 0,25 мм/об		
	δфакт., мкм	δ расч., мкм	погр., %	δфакт., 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

В таблице 3.22 видно, что средняя погрешность расчетов по эмпирической модели (3.6) не превышает 1,9%, при максимальном значении

погрешности 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. Например на скорости резания 5,53 м/мин и на подаче 0,1 мм/об расчетная глубина дефектного поверхностного слоя отверстий составит 14,9 мкм, что соответствует экспериментальным данным (табл. 3.10) и не превышает минимальную глубину дефектного поверхностного слоя при нормальном развертывании [56]. Это позволяет значительно снизить трудоемкость обработки отверстий высокой точности за счет исключения из технологического процесса их обработки переходы рассверливания, черногого и чистового зенкерования и нормального развертывания.

3.5. Упрочнение поверхностного слоя отверстий

Одним из показателей качества поверхностного слоя отверстий являются остаточные напряжения в поверхностном слое [56]. 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 результаты анализа твердости поверхности отверстий, обработанных сверлами нормальной точности класса В, имеющих осевое биений режущих кромок 0,3 мм [71]. Собственная твердость заготовок HRC 8.

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

<i>V</i> , м/мин	<i>S</i> , 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 видно, что в твердость поверхности обработанной сверлением средним возросла в 1,76 (среднее значение \overline{HRC} 14,1).

3.5.1. Корреляционный анализ влияния параметров режима резания на твердость поверхности просверленных отверстий

В таблице 3.23 видно, что связь между параметрами режима резания и твердостью поверхности отверстий явно не выражена. Определить наличие и тесноту связи между ними позволяет коэффициент линейной корреляции Пирсона, для правомочности применения которого предварительно необходимо убедиться, что распределение сравниваемых результатов исследований нормальное, т.е. подчиняется закону нормального распределения Гаусса.

Методика проверки соответствия распределения закону Гаусса для выборок малого объема ($15 < n < 50$) регламентирована ГОСТ [59], согласно которой нормальность распределения проверяют при помощи составного критерия (критерий 1 и критерий 2). Если хотя бы один из критериев не соблюдается, то считают, что распределение результатов исследований не соответствует нормальному.

Критерий 1

Вычисляют отношение \bar{d} используя зависимости (2.1) и (2.2), которое равно 0,8599

Результаты исследований можно считать распределенными нормально, если $0,7304 \leq 0,8599 \leq 0,8768$ (табл. 2.8).

Критерий 2

Можно считать, что результаты исследований принадлежат нормальному распределению, если не более 1 (табл. 2.10) разностей $|\overline{\text{HRC}} - \overline{\text{HRC}}|$ превзошли значение $Z_{p/2}S$. $Z_{p/2} = 2,33$ (табл. 2.11), $S = 2,9590$ (2.3), не одного значения $|\overline{\text{HRC}} - \overline{\text{HRC}}|$ не превзошли $Z_{p/2}S = 6,89447$. Максимальное значение разности $|\overline{\text{HRC}} - \overline{\text{HRC}}|$ равно 6,2.

Распределение твердости поверхности отверстий можно считать нормальным.

Для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий заполняется таблица 2.12 которая на подаче $S = 0,25$ мм/об будет иметь вид (табл. 3.24).

Таблица 3.24 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий (HRC- τ) на подаче 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

Коэффициент корреляции рассчитывается по зависимости 2.4, которая будет иметь вид

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

Используя данные таблицы 3.23 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.7) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.1) коэффициент корреляции $r = 0,5095$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.25 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий на подаче $S = 0,2$ мм/об

Таблица 3.25 – Данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий ($HRC - \tau$) на 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 данные таблицы 3.25 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.7) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.1) коэффициент корреляции $r = -0,479$

не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.26 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между скоростью резания и твердостью поверхности отверстий на подаче $S=0,16$ мм/об

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

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

Используя данные таблицы 3.26 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.7) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.7) коэффициент корреляции $r = -0,767$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.27 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий на скорости резания $V=5,53$ м/мин

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

№	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

м/мин

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле

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

Используя данные таблицы 3.26 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.8) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.8) коэффициент корреляции $r = 0,2164$ не является значимым (табл. 2.12).

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

В таблице 3.28 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий на скорости резания $V=4,32$ м/мин

Используя данные таблицы 3.28 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.8) получим

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

Рассчитанный по зависимости (4.2) коэффициент корреляции $r = -0,682$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.29 представлены данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий на скорости резания $V=3,45$ м/мин

Таблица 3.29 – Данные для расчета коэффициента корреляции между подачей и твердостью поверхности отверстий (HRC - τ) 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 таблицы 3.29 для расчета коэффициента корреляции по зависимости (3.8) получим

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

Рассчитанный по зависимости (3.8) коэффициент корреляции $r = -0,291$ не является значимым (табл. 2.12).

В таблице 3.30 представлены результаты проверки корреляции между параметрами режима резания и глубиной дефектного поверхностного слоя отверстий обработанных сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм.

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 значим	3,45	-0,291	не значим
0,2	-0,479	не значим	4,32	-0,682	не значим
0,25	0,5095	не значим	5,53	0,216	не значим

В таблице 3.30 видно отсутствие связи между параметрами режима резания и твердостью поверхности отверстий сверлами нормальной точности класса В, которые имели большое осевое биение режущих кромок 0,3 мм.

Аналогично проведен корреляционный анализ результатов исследований представленных в таблице 3.31.

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

В таблице 3.31 представлена твердость поверхности отверстий при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок 0,06 мм [72,73].

В таблице 3.31 видно, что связь между параметрами режима резания и твердостью обработанной поверхности отверстий имеет место. На скорости 4,32 м/мин твердость с увеличением подачи возрастает от *HRC* 8,3 до *HRC* 12,8, на скорости 5,53 м/мин - от *HRC* 10,7 до *HRC* 14,3, при собственной твердости материала заготовок *HRC* 8.

Проверка распределения твердости (табл. 3.31) по методике регламентированной ГОСТ [59] для выборок малого объема подтвердила соответствие этого распределения закону Гаусса.

В таблице 3.32 представлены результаты проверки корреляции между параметрами режима резания и твердостью поверхности отверстий обработанных сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой режущей части, которые имели осевое биение режущих кромок не превышала 0,06 мм.

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

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

В таблице 3.32 видно при работе сверлами повышенной точности класса А1 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, у которых осевое биение режущих кромок не превышало 0,06 мм, имеет место значимая связь между

скоростью резания и твердостью поверхности отверстий на подачах 0,2 и 0,25 мм/об. Значимая связь между подачей и твердостью поверхности отверстий имеет место на скоростях резания 3,45, 4,32 и 5,53 м/мин.

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. показывает на наличие зависимости случайных переменных величин, но не вид этой зависимости [65].

Вид зависимостей твердости поверхностного слоя просверленных отверстий от параметров режима резания при сверлении сверлами повышенной точности класса А1 представлен на рисунках 3.9 и 3.10.

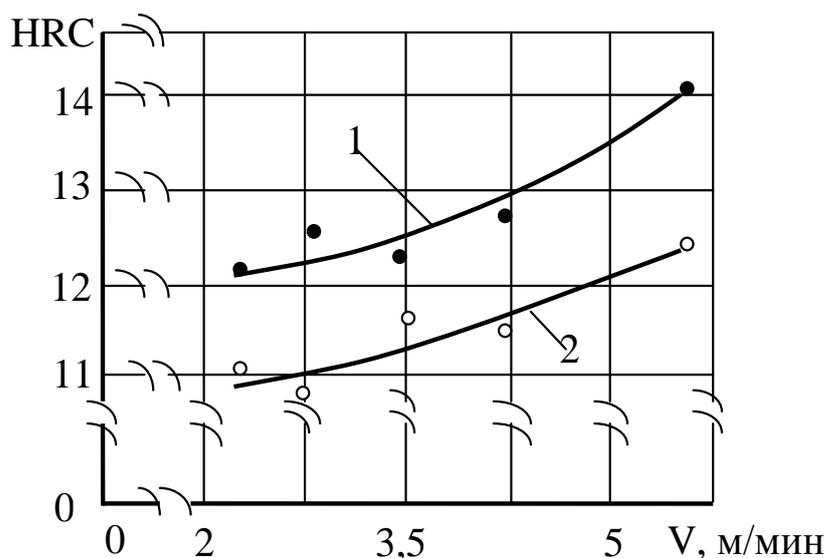


Рисунок 3.9 – Зависимость твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания, где 1 – S = 0,25 мм/об, 2 – S = 0,2 мм/об.

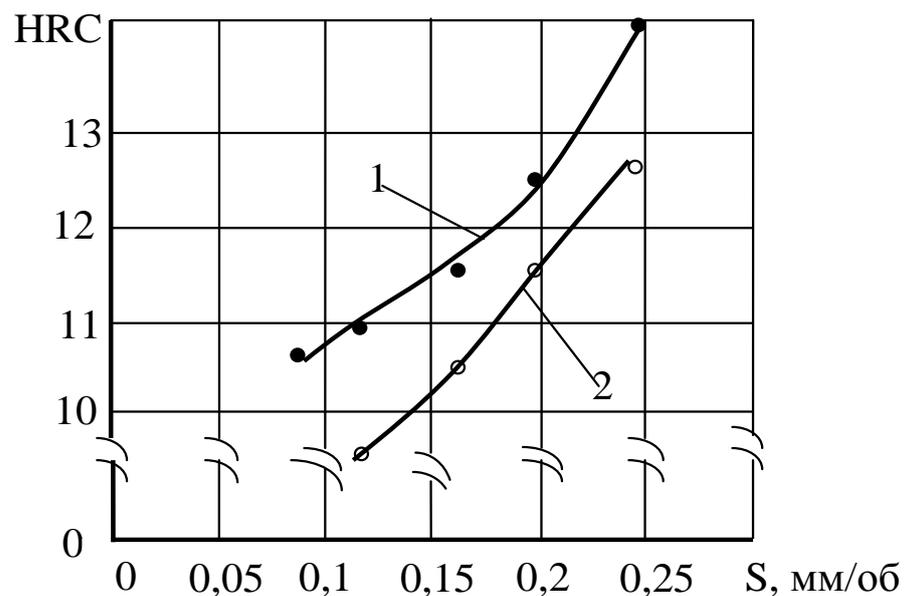


Рисунок 3.10 – Зависимость твердости обработанной поверхности отверстий от подачи, где 1 – $V = 5,53$ м/мин, 2 – $V = 4,32$ м/мин.

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

Кривые графиков рисунок 3.9 и рисунок 3.10 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.

3.5.2.1. Определение коэффициентов регрессии зависимостей твердости обработанной поверхности отверстий от подачи на скорости резания $V = 4,32$ м/мин

$$(HRC = \tau)$$

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.33.

Таблица 3.33 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости

№	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

Точности расчетов проверяется по формуле:

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

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

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

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

Линейная зависимость имеет вид:

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

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент корреляции по формуле:

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

Степенная зависимость

Заполняется таблица 3.34

Таблица 3.34 – Данные для расчета коэффициентов регрессии степенной зависимости

№	$\ln \tau_i$	$\ln S_i$	$(\ln \tau_i)^2$	$(\ln S_i)^2$	$\ln \tau_i \ln S_i$	$(\ln \tau_i + \ln S_i)^2$
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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Степенная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается 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

№	$\ln \tau_i$	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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается по формуле:

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

3.5.2.2. Определение коэффициентов регрессии твердости обработанной поверхности отверстий от скорости резания на подаче $S = 0,2$ мм/об

$$(HRC = \tau)$$

Линейная зависимость

Заполняется таблица 3.36.

Таблица 3.36 – Данные для расчета коэффициентов регрессии линейной зависимости

№	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:

$$\begin{aligned} \Sigma(\tau_i + V_i)^2 &= \Sigma \tau_i^2 + 2 \Sigma \tau_i V_i + \Sigma V_i^2 = 569,72 + 2 \cdot 201,693 + 73,5158 \\ &= 1046,6218. \end{aligned}$$

Коэффициенты уравнения регрессии рассчитываются по формулам:

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

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

Линейная зависимость имеет вид:

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

Для проверки линейности полученной зависимости рассчитывается коэффициент 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

№	$\ln \tau_i$	$\ln V_i$	$(\ln \tau_i)^2$	$(\ln V_i)^2$	$\ln \tau_i \ln V_i$	$(\ln \tau_i + \ln V_i)^2$
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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии степенной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Степенная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается 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 3.37

Таблица 3.38 - Данные для расчета коэффициентов регрессии экспоненциальной зависимости

№	$\ln \tau_i$	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:

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

Коэффициенты уравнения регрессии экспоненциальной зависимости рассчитываются по формулам:

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

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

Экспоненциальная зависимость имеет вид:

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

Коэффициент корреляции рассчитывается 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 глубины дефектного поверхностного слоя от скорости резания на подаче 0,25 мм/об. Результаты аппроксимации графических зависимостей, представленных на рисунок 3.9 и рисунок 3.10 представлены 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 · S ^{0,4692}	0,997	5	HRC = 18,447 · S ^{0,2261}	0,92
3	HRC = 6,522 · e ^{2,7977}	0,98	6	HRC = 9,332 · 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·e ^{0,124V}	0,97	6	HRC = 10,912·e ^{0,0439V}	0,9

3.5.3. Построение эмпирической модели зависимости твердости от параметров режима резания

Аппроксимация результатов исследований влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя просверленных отверстий, представленных на рисунке 3.9 и рисунке 3.10 позволила определить коэффициенты регрессии трех статистических зависимостей для сочетания скоростей резания и подач, показанных в таблицах 3.38 и таблице 3.39. Сравнительный анализ коэффициентов корреляции показал, что наиболее адекватными результатам исследований являются степенные зависимости №2 таблице 3.38 (r=0,997) и №2 таблице 3.39 (r=0,99), которые следует использовать для получения обобщенной эмпирической зависимости. Указанные зависимости имеют вид (3.9) и (3.10)

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

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

Разработка эмпирической модели заключается в определении постоянного коэффициента a зависимости (3.11) использованием результатов испытаний, представленных в таблице 3.30 следующим образом (3.12)

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

$$a_i = \frac{HRC_i}{V^{0,415}S^{0,4692}}. \quad (3.12)$$

Постоянный коэффициент a определяется зависимостью (3.13)

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

В результате применения настоящей методики получена эмпирическая модель для расчета твердости поверхностного слоя просверленных отверстий при варьировании скоростью резания и подачи в виде

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

Проведен сравнительный анализ адекватности эмпирической модели (3.14) результатам настоящих исследований (табл. 3.41), который позволил определить фактические и рассчитанные значения твердости поверхностного слоя отверстий и погрешность расчетов.

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

В таблице 3.41 видно, что средняя погрешность расчетов 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, а значит и твердость обработанной сверлением поверхности

отверстий. Например на скорости резания 6 м/мин и на подаче 0,3 мм/об твердость обработанной поверхности составит *HRC* 15,92, при этом твердость обработанной сверлением поверхности возрастет практически в два раза.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

1. Корреляционный анализ позволил определить отсутствие значимой связи между параметрами режима резания, глубиной дефектного поверхностного слоя и твердостью поверхности отверстий просверленных сверлами нормальной точности класса В с осевым биением режущих кромок 0,3 мм.

2. Корреляционный анализ позволил определить наличие значимой связи между параметрами режима резания, глубиной дефектного поверхностного слоя и твердостью поверхности отверстий просверленных сверлами повышенной точности класса А1 с осевым биением режущих кромок 0,06 мм.

5. Регрессионный анализ результатов исследований позволил разработать эмпирические модели, с высокой степенью точности отражающие влияние параметров режима резания 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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫПОЛНЕННОЙ РАБОТЫ

1. Экспериментально определены условия обработки сверлением, при которых имеет место влияние параметров режима резаний на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

2. Экспериментально определен характер влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий.

3. Разработаны эмпирические модели влияния параметров режима резания на глубину дефектного поверхностного слоя и твердость поверхности просверленных отверстий, позволяющие исключить из технологического процесса обработки отверстий высокой точности ряд технологических переходов, таких как рассверливание, черновое и чистовое зенкерование и нормальное развертывание.

4. Разработана методология планирования, организации и проведения исследований объектом которых является качество поверхностного слоя и твердость поверхности отверстий, обработанных сверлением, а переменными независимыми факторами – параметры режима резания.

ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Для контроля симметричности расположения режущих кромок относительно оси рабочей части сверла использовать осевое биение режущих кромок, проверяемое посередине режущей кромки в направлении параллельном оси рабочей части сверла вместо допуска биения, проверяемого посередине режущих кромок в направлении перпендикулярном режущей кромке.

2. Допуск осевого биения режущих кромок для всех классов точности сверл не должен быть более половины подачи на оборот сверла.

3. Для обработки отверстий сверлением использовать сверла повышенной точности класса А1 по ГОСТ 2034-80 с двухплоскостной заточкой задних поверхностей, у которых осевое биение режущих кромок не превышает 0,06 мм.

4. Использовать следующие параметры режима резания: скорость резания 4,32 -5,56 м/мин, подача 0,2-0,25 мм/об.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Рагрин, Н.А.** Обработка материалов и инструменты [Текст] : Учебник / А.Н. Рагрин. – Бишкек : Текник, 2012. – 156 с.
2. Технология машиностроения [Текст]: курс лекций / А.Г. Ткачѳв, И.Н. Шубин. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 164 с.
3. Технология машиностроения. Т. 1 [Текст] / Под общ. ред. А.М. Дальского. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. — 564 с.
4. **Заплатин, В.Н.** Справочное пособие по материаловедению (металлообработка) [Текст]: учеб. Пособие для нач. проф. Образования / В.Н. Заплатин, Ю.И. Сапожников, А.В. Дубов. - М.: Издательский центр «Академия», 2007.-224 с.
5. **Фетисов, Г.П.** Материаловедение и технология металлов [Текст] : учеб.для студентов машино-строит. спец. вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпиан, В.М. Матюнин и др.; Под ред. Г.П. Фетисова - 5-е изд., стер. - М.: Высш. Шк., 2007. - 862 с.; ил.
6. **Суслов, А.Г.** Экспериментально-статистический метод обеспечения качества поверхности деталей машин [Текст]: Монография / А.Г. Суслов, О.А. Горленко. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 303 с.
7. **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. - 193с.
8. **Старосельский, А.А.** Долговечность трущихся деталей машин [Текст] / А.А. Старосельский, Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение, 1967. - 396 с.
9. Технология машиностроения. Кн. 1 [Текст] / Под ред. С.Л. Мурашкина. - М.: Высшая школа, 2005. 278 с.
10. **Болховитинов, Н.Ф.** Металловедение и термическая обработка [Текст] / Н.Ф. Болховитинов. -М.: Машиностроение, 1965. - 503 с.
11. **Кожевников, Д.В.** Резание материалов [Текст]: учебник /Д.В. Кожевников, С.В. Кирсанов. — Москва : Машиностроение, 2012. — 304 с.

12. **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 : Изд-во ТулГУ, 2002. - С. 351-364.

13. **Губанов, В.Ф.** 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 Курганского гос. ун-та, 2007. – 84 с.

14. **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.

15. **Халл, Д.** Введение в дислокации [Текст] /Д. Халл. - М.: Атомиздат, 1968. 295 с.

16. Основы материаловедения [Текст] / Под ред. А.В. Смирнова. - М.: Машиностроение, 1976. -272 с

17. **Розанова, А.М.** Структура белых фаз после термической обработки [Текст] / А.М. Розанова, Л.И. Симаков // Металловедение и термическая обработка металлов № 5. – М.: 1979. - 173 с

18. **Коршунов, В.Я.** Разработка научных основ формирования параметров состояния поверхностного слоя деталей машин в процессе резания / В.Я. Коршунов // Изв. вузов Сев-Кавк. регион, техн. науки, 2005. Специальный выпуск. - С. 73 - 78.

19. Технологические остаточные напряжения [Текст] / Под ред. А.В. Подзей. - М.: Машиностроение, 1973. - 216 с.

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

21. **Папшев, Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием [Текст] / Д.Д. Папшев. - М.:

Машиностроение, 1978. -152с.

22. **Дальский, А.М.** Технологическая наследственность в машиностроительном производстве [Текст] / А. М. Дальский, Б. М. Базров, А. С. Васильев и др.; Под ред. А. М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.

23. **Губанов, В.Ф.** Новый способ финишной обработки давлением [Текст] / В.Ф. Губанов, В.Н. Орлов, Д.А. Маслов // Технология машиностроения. – 2005. – № 12. – С.20-21.

24. **Коршунов, В.Я.** Разработка научных основ формирования параметров состояния поверхностного слоя деталей машин в процессе резания [Текст] / В.Я. Коршунов // Изв. вузов Сев-Кавк. регион, техн. науки, 2005 Специальный выпуск. - С. 73 - 78.

25. **Суслов, А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин [Текст] / А.Г. Суслов. М.: Машиностроение, 2000. - 320 с.

26. **Яковлев, Г.М.** Технологические основы надежности и долговечности машин [Текст] / Г.М. Яковлев. - Минск. Беларусь, 1964. - 315 с.

27. Остаточные напряжения [Текст] / Под ред. В.Р. Осгуда. М.: Иностранная литература, 1957. 395 с.

28. **Безъязычный, В. Ф.** Технологические процессы механической и физико-химической обработки в авиадвигателестроении [Текст] : учебное пособие / В. Ф. Безъязычный, М. Л. Кузменко, В. Н. Крылов и др. ; под общ. ред. В. Ф. Безъязычного. - 2-е изд., доп. – М.: Машиностроение, 2007. - 539 с.

29. **Дальский, А.М.** Технология конструкционных материалов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей [Текст] / А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, Л.Н. Бухарин и др.; Под общ. ред. А. М. Дальского.- М.: Машиностроение, 2004. — 559 с.

30. **Макушок, Е.М.** 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.

31. **Губанов, В.Ф.** 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 Курганского гос. ун-та, 2007. – 84 с.
32. **Чепа, П.А.** Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием [Текст] / П.А. Чепа. - Минск: Наука и техника, 1981. - 291 с.
33. **Самсонов, В.А.** Технологическое обеспечение качества изделий в машиностроении [Текст]: Учебное пособие для выполнения выпускных квалификационных работ и магистерских диссертаций / В.А. Самсонов, Т.Э. Сартов, М.К. Сопоев. – Бишкек: КГТУ им. И. Раззакова. – ИЦ «Текник», 2016.- 304 с.
34. **Мухин, В.С.** Технологические методы обеспечения качества поверхности деталей [Текст] / В.С. Мухин. -Уфа: УАИ, 1981. - 73 с.
35. **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.
36. **Филяев, А.Т.** Исследование износостойкости деталей упрочненных наклепом [Текст] / А.Т. Филяев. - Минск: Наука и техника, 1974. - 217 с.
37. **Вишняков, М.А.** Конструкторско-технологические методы обеспечения качества изделий машиностроения [Текст]: Учебное пособие/ М.А. Вишняков, Ю.А. Вашуков. – М: СГАУ имени академика С П. Королева, 2005.-83 с.
38. **Суслов, А.Е.** Качество машин [Текст]: Справочник: В 2-х т. /А.Е. Суслов, Э.Д. Бронштейн, Н.А. Виткевич и др. - М.: Машиностроение, 1995. - 256 с.
39. **Коршунов, В.Я.** Обеспечение заданных параметров качества поверхностного слоя детали по КПД абразивной обработки [Текст] / В.Я. Коршунов // Изв. вузов. Сев.- Кав. регион, техн. науки. 2001. - №2, - С. 27 - 28.

40. **Анурьев, В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / под ред. И. Н. Жестковой. — 8-е изд., перераб. и доп. — М. : Машиностроение, 2001. — ББК 34.422

41. **Марков, Н. Н.** Нормирование точности в машиностроении [Текст]: Учеб. для машиностроит. спец. вузов. / Н. Н. Марков, В. В. Осипов, М. Б. Шабалина / Под. ред. Ю. М. Соломенцева. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высш. шк.; Издательский центр «Академия», 2001. – 335 с., ил.

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

43. **Любомудров, С.А.,** Метрология, стандартизация и взаимозаменяемость [Текст]: Учебн. Пособие / С. А. Любомудров, А. А. Смирнов, С. Б. Тарасов. – Самара: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. -188 с.

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

45. ГОСТ 10903-77 Сверла спиральные с коническим хвостовиком

46. ГОСТ 4010-77 Сверла спиральные с цилиндрическим хвостовиком

47. ГОСТ 2034-80 Сверла спиральные. Технические условия

48. Клаасен К.Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике. - М.: Постмаркет, 2000. - 352 с.

49. Бирюков С.В., Чередов А.И. Методы и средства измерений: Учебное пособие. - Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. - 88 с.

50. Д.Ф. Тартаковский А.С. Ястребов. Метрология, стандартизация и технические средства измерений: Учеб. для вузов. - М.: Высш. шк., 2001- 205с.

51. Дивин, А.Г. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : Учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев. - Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ, 2011. - Ч. 1. - 104 с. - 100 экз. -ISBN 978-5-8265-0987-6.

52. Рябов В.П., Позняк Е.С. Методы и средства измерений, испытаний и контроля. - М.: МУГП. - 2009. - 157 с.

53. Ранеев Г.Г., Тарасенко А.П. Методы и средства измерений. - М.: Академия. - 2006. - 336 с.
54. ГОСТ 868-82 Нутрометры индикаторные с ценой деления 0,01 мм
Технические условия.
55. ГОСТ 6507-90 Микрометры Технические условия
56. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с., ил.
57. Рагрин Н. А. Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении // Технология Машиностроения. – М., 2013. - № 12. - С.15-24.
58. Рагрин Н.А. Математическая обработка экспериментальных данных/КГТУ им. И. Раззакова;– Б.: ИЦ «Текник», 2013. – 82 с.
59. ГОСТ 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения, приложение Б
60. Рагрин Н.А., Дыйканбаева У.М. Разработка и обоснование путей повышения качества поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением// Технология машиностроения. – М.: Технология машиностроения, 2020, № 7. - С. 55-60.
61. Рагрин Н.А., Дыйканбаева У.М. Разработка методов повышения качества отверстий сверлением, обработанных сверлением// Научное обозрение. – М.: Научное обозрение, 2020, № 1. - С. 32-48.
62. Дыйканбаева У.М., Рагрин Н.А. Повышения качества поверхностного слоя просверленных отверстий, обработанных сверлением // Известия КГТУ. – Бишкек: 2021. - № 2(58). - С. 21-25.
63. Рагрин Н.А., Дыйканбаева У.М., Айнабекова А.А., Курганова Д.М. Повышение качества поверхностного слоя отверстий //Вестник КРСУ.- Бишкек: Издательство КРСУ, 2021. № 12(21) - С. 112-118.
64. Дыйканбаева У.М., Рагрин Н.А. Повышения качества поверхностного слоя просверленных отверстий //Труды четырнадцатой общероссийской

научно-практической конференции: Инновационные технологии и технические средства специального назначения. - Санкт-Петербург: Библиотека журнала «Военмех . Вестник БГТУ», 2022. № 81, Том 1. – С. 117-121.

65. Лукомский, Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. М. : Машиностроение, 1961. - 375 с.

66. Н.А. Рагрин Научные основы повышения качества поверхности обработанной быстрорежущими спиральными сверлами Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Дыйканбаева У.М. Технология машиностроения. 2017. № 5. С. 13-16.

67. Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Дыйканбаева У.М. Разработка и обоснование закономерностей повышения показателей качества отверстий, обработанных сверлением // Известия КГТУ. - Бишкек, 2018.-№ (46). - С. 77-89.

68. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. Учебник для вузов. Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1977. - 423 с. С ил.

69. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. - 320 с.

70. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 944 с., ил.

71. Рагрин Н. А., Дыйканбаева У.Д., Айнабекова А. А., Курганова Д.М. Повышение качества поверхностного слоя отверстий при обработке сверлением//Машиноведение.- Бишкек: ИМАНАН КР, 2021. № 2 (14) – С.76-82.

72. Рагрин Н.А., Дыйканбаева У.М., Курганова Д.М. Обеспечение качества поверхностного слоя отверстий, обработанных сверлением//Вестник КРСУ.- Бишкек: Издательство КРСУ, Том 22. № 4 - С. 179-185.

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



КЫРГЫЗ РЕСПУБЛИКАСЫ



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ПАТЕНТ

№ 264

Пайдалуу моделдин аталышы: *Көзөөч*

Патент ээси, елкөсү: *Кыргызстан - Россия Славян университети (КГ)*

Автору (авторлору): *Рагипи И. А., Дыйканбаева У. М. (КГ)*

Өтүнмөнүн № *20180009.2*

Пайдалуу моделдин артыкчылыгы: *2018-жыл, 15-май*

Кыргыз Республикасынын Пайдалуу моделдеринин мамлекеттик реестринде катталган: *2019-жылдын 30-июнунда*

Ушул пайдалуу моделге берилген өтүнмө ээси (патент ээси) жоопкер болгон патент Кыргыз Республикасынын аймагында пайдалуу моделге ээлик кылуу э, аны пайдаланууга, тоскоого, ошондой эле аны башка адамдардын пайдалануусуна тыюу салууга патент ээсинин өзгөчө укугун ырастайт

Торайым

Д. Молдатеева

КЫРГЫЗСКАЯ РЕСПУБЛИКА



КЫРГЫЗПАТЕНТ

ПАТЕНТ

№ 264

Название полезной модели: *Сверло*

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

Автор (авторы): *Рагзин 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 патентоладельца на владение, использование, а также запрещение использования другими лицами на территории Кыргызской Республики.

001746

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° - 8° 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 стенку просверливаемого отверстия и повышения стойкости сверла.

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

Задачей полезной модели является повышение стойкости сверла 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

Формула полезной модели

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 участ-

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 сверла и качество обработанной поверхности повышается за счет отсутствия трения ленточек о стенку просверливаемого отверстия и зачистки поверхности отверстия вспомогательными режущими кромками.

ки ленточек на местах подточки, отличающемся с 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.

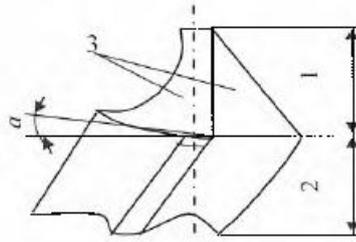
тек заго-
чки задни-
щей части
водичи ст-

а в плане,
горизон-
и направ-

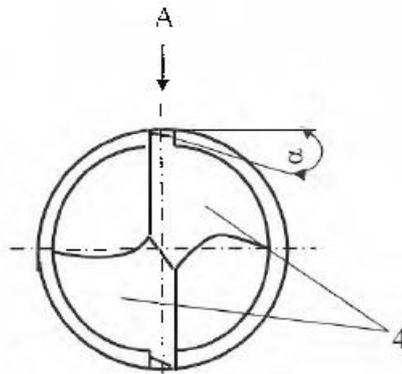
равлю-
рхности,
ли заго-
ной ча-
ле заго-
данных
части и
ждуей

ризом,
вие и
данные
ой об-
твер-
вспо-
дакт

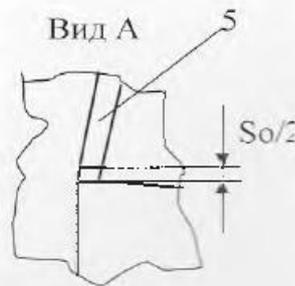
оган
гоул-
ран-
ости
ими



Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

Выпущено отделом подготовки официальных изданий

Государственная служба интеллектуальной собственности и инноваций при Правительстве Республики Каргызской Республика,
720021, г. Бишкек, ул. Московская, 62, тел.: (312) 68 98 88, 68 36 91; факс: (312) 68 17 01

«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 шероховатостей: рассверливание, черпковое и чистовое зенкерование, нормальное и чистовое развёртывание.
4. **Эффект от внедрения:** повышение качества и снижение трудоемкости изготовления продукции.
5. **Место и время внедрения:** ОсОО «Автомаш-Радиатор» г. Бишкек, ул. Магросова 1А/1 от «15» ноября 2024г
6. **Форма внедрения:** по результатам диссертационной работы разработаны рекомендации, которые будут использованы при изготовлений продукции предприятия.

Представитель организации, в которую внедрена разработка

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

Представитель организации, из которого исходит внедрение

Э.С.Абдраимов - д.т.н., профессор, заведующей кафедрой
 Технологии машиностроения, КГТУ им. И. Раззакова


 А. РАЗЗАКОВ АТЫНДАГЫ
 КЫРГЫЗ МАМЛЕКЕТТИК
 ТЕХНИКАЛЫК УНИВЕРСИТЕТИ
 Колу: Исхметьян
 Адам: ресурстар
 Башкы директор, илик басчысы

«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор КГТУ им. И. Раззакова
к.т.н., доцент М.К. Чыныбаев

«21» ноября 2024г.

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

1. **Автор внедрения:** соискатель Дыйканбаева Урния Маматкадыровна
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». Рекомендуется 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

И. РАЗЗАКОВ АТЫНДАГЫ
КЫРГЫЗ МАЛЛЕКЕТТИК
ТЕХНИКАЛЫК УНИВЕРСИТЕТИ

Колун тастыган
Адам ресурстар
башкармалыгынын башчысы

19.11.24

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ОсОО «Ала-Таш»

Чиналиев 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 изготовлений 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, КГТУ им. И. Раззакова

