

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Волгоградский государственный технический университет

На правах рукописи



Малинин Павел Витальевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОЙ НАСТРОЙКИ
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ПРОХОДНОГО
БЕСЦЕНТРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Бочкарев Петр Юрьевич

Камышин - 2025

Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Анализ и направления развития методов бесцентровой шлифовальной обработки	13
1.1 Современное состояние вопросов использования методов бесцентрового шлифования	13
1.2 Анализ структуры и схем операций бесцентрового шлифования	19
1.3 Технические средства оснащения операций бесцентрового шлифования	22
1.4 Технологическая подготовка операций бесцентрового шлифования	26
1.5 Подходы и приемы при наладке оборудования	34
Выводы по главе 1	55
Глава 2. Разработка моделей рациональной настройки технологических операций проходного бесцентрового шлифования	56
2.1 Классификация операций бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим признакам	56
2.2. Назначение параметров при наладке операций проходного бесцентрового шлифования	64
2.3 Модель определения точек контакта заготовки с элементами технологической оснастки.....	71
2.4 Анализ выполнения условия силового замыкания.....	78
2.5 Формирование схемы сил в процессе обработки заготовки и назначение технологических режимов.....	82
Выводы по главе 2.....	102
Глава 3. Методика проведения экспериментальной проверки, работоспособности моделей.....	104

3.1 Методика проведения эксперимента.....	104
3.2 Формирование данных по технологиям и используемому оборудованию при проведении экспериментальных исследований.	105
3.3. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения действий по расчету параметров в сечениях рабочей зоны.....	110
3.4. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения действий по расчету величины припуска	114
3.5. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения условия силового замыкания	116
Выводы по главе 3	119
Глава 4. Экспериментальные исследования по оценке работоспособности созданных процедур наладки операций проходного бесцентрового шлифования	120
4.1. Результаты выполнения проектных процедур определения рациональных наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования.....	120
4.2. Определение снижения трудоемкости выполнения наладки при использовании разработанных моделей.	147
Выводы по главе 4.....	150
Заключение	152
Список использованных источников	154
Приложение 1	168
Приложение 2	182
Приложение 3	183
Приложение 4	184
Приложение 5	185
Приложение 6	186

Приложение 7	187
Приложение 8	188
Приложение 9	189
Приложение 10	190
Приложение 11	191
Приложение 12	192
Приложение 13	193
Приложение 14	194
Приложение 15	195
Приложение 16	196
Приложение 17	197

Введение

Актуальность темы исследования. Один из наиболее эффективных способов обработки поверхностей заготовок, имеющих конструкционную форму тела вращения, с точки зрения высокого уровня производительности и обеспечения стабильности качества заданных параметров, можно выделить бесцентровое шлифование. При достаточно широком спектре различных способов обработки поверхностей деталей, имеющих цилиндрическую форму, бесцентрово-шлифовальные операции являются наиболее перспективными и эффективными. В области современной металлообработки технология бесцентрового шлифования занимает особое место, благодаря высокой эффективности и своим уникальным техническим характеристикам. Но имеет достаточно ограниченную область применения невзирая на свои явные преимущества. Для решения задачи связанной с расширением области применения необходим научно-обоснованный подход к технологии бесцентрового шлифования. Сложность настройки оборудования существенно ограничивает применение данного метода обработки из-за отсутствия стандартизированных процедур. Качество изделий и эффективность работы напрямую зависят от квалификации и опыта операторов станков [28]. Производственный процесс и результаты операций подвержены субъективному влиянию человеческого фактора. Ключевая исследовательская задача заключается в понимании механизма относительного движения детали, которое непосредственно связано с силовыми взаимодействиями между компонентами станочной системы на протяжении всей рабочей зоны. В современных условиях отсутствует четкое понимание этих процессов.

Высокие затраты времени, сложности настройки и контроля производственного процесса сделали бесцентровое шлифование доступным исключительно для масштабных производственных операций. Нерешенность этой проблемы существенно ограничивает применение данной технологии вне сферы массового и крупносерийного изготовления деталей. Принимая во внимание

ограниченность развития технологической подготовки изготовления деталей на оборудовании бесцентрового шлифования, особо важным является создание полноценных моделей, способных подробно описать все аспекты функционирования данного подтипа оборудования. Для этого необходимо проведение расширенного анализа условий функционирования и различных схем способов обработки заготовок методом бесцентрового шлифования, создание научно-методических принципов технологической подготовки производства на основе реально складывающейся производственной ситуации.

Степень разработанности: на данный момент основные теоретические исследования в области технологического обеспечения методов бесцентрового шлифования сосредоточены на вопросах определения формообразования ведущих кругов и движения заготовки при выполнении обработки: Я.М. Ашкиназий, Б.М. Бржозовский, Б.И. Черпаков, В.Н. Масленников, В.И. Муцялко, А.Ф. Прохоров, В.И. Сломнинский.

В данном исследовании на ряду с вышеперечисленными вопросами решается задача взаимовлияния предлагаемых настроечных параметров операций проходного бесцентрового шлифования с учетом реального состояния технологической оснастки, выполнения условия силового замыкания в зоне обработки, определение составляющих сил резания в местах контакта заготовки с элементами оборудования.

Целью работы является повышение производительности обработки заготовок методом проходного бесцентрового шлифования с учетом обеспечения стабильности параметров качества обрабатываемых поверхностей за счет рациональной наладки оборудования. Основным предмет исследования - проектные процедуры назначения технологических параметров наладки и реализации операций проходного бесцентрового шлифования.

Задачи исследования:

1. Проанализировать опубликованные результаты научных исследований, методические и нормативно-справочные материалы в области технологического обеспечения операций бесцентрового шлифования.
2. Провести группирование операций бесцентрового шлифования на основе конструктивных и технологических особенностей обрабатываемых деталей и достижимых при обработке показателей качества.
3. Формализовать проектные процедуры по установлению координатных взаимосвязей между размерными характеристиками обрабатываемой поверхности и компонентами технологической системы оборудования в пространстве рабочей зоны станка.
4. Разработать методы выполнения проектных процедур этапов наладки проходного бесцентрового шлифования.
5. Разработать схему и математически описать взаимодействие сил, возникающих в процессе обработки методом проходного бесцентрового шлифования.
6. Разработать математическое, алгоритмическое и программное обеспечение выполнения проектных процедур технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования.
7. Разработать методику проведения эксперимента с целью подтверждения работоспособности созданных процедур наладки операций проходного бесцентрового шлифования, провести экспериментальные проверки, обработать и проанализировать полученные результаты.
8. Апробировать разработанные модели и методики в условиях действующих производственных систем.

Научная новизна:

1. Созданы методические положения проведения классификации способов бесцентрового шлифования с возможностью учета конкретных условий и особенностей организации производства по критериям однородности проектных процедур технологической подготовки.
2. На основе разработанных формализованных моделей научно обоснована предлагаемая последовательность проведения наладки операций проходного бесцентрового шлифования в зависимости от реального состояния средств технологического оснащения.
3. Выявлены причинно-следственные связи для определения составляющих величин припуска в отдельных секторах рабочей зоны на операциях проходного бесцентрового шлифования.
4. Разработан метод создания обобщенной модели установления составляющих сил, возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности со шлифовальным, ведущим кругами и плоскостью опорного ножа.
5. Обоснован комплексный принцип процесса разработки и управления технологическими процессами операций проходного бесцентрового шлифования с учетом реального состояния и конструктивных особенностей оборудования и средств технологического оснащения.
6. Результаты теоретических исследований, их систематизация расширяют научно-методическую базу создания автоматизированных систем проектирования, объективно устанавливающие на основе данных о складывающейся производственной ситуации рациональные параметры настройки и управления реализацией операций проходного бесцентрового шлифования.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Выполнено последовательное формирование кластеров технологических структур способов бесцентрового и проходного бесцентрового

шлифования по критерию согласованности процедур проектирования и технического сопровождения на отдельных этапах технологического обеспечения.

2. На основе созданных моделей осуществлена разработка алгоритмического и программного обеспечения определения наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования, снижающая роль субъективного фактора при выполнении наладки.

3. Разработано методическое сопровождение выполнения расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки с учетом реального состояния технологической системы, характеристик обрабатываемой поверхности и их влиянием на относительную ориентацию детали на протяжении всего процесса обработки.

4. Проведены исследования и анализ сил, возникающих при контакте детали с элементами технологической системы, с использованием имитационного моделирования, устанавливающих взаимосвязи между ними и влиянием широкого ряда факторов на процесс проходного бесцентрового шлифования.

5. Реализован итерационный подход, позволяющий на основе сгенерированных вариантов наладочных параметров с учетом реального состояния оборудования и средств технологического оснащения, взаимного пространственного расположения обрабатываемой детали и компонентов системы в течении всего процесса обработки, устанавливать рациональные режимы обработки.

6. Результаты экспериментальной апробации исследований в условия действующих производственных комплексов подтвердили возможность применения созданных методических материалов на машиностроительных предприятиях. Их использование позволило снизить трудоемкость наладки не менее 30% и обеспечить стабильность качественных характеристик обрабатываемых поверхностей.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базируются на научных основах технологии машиностроения, основных положениях математики, теоретической механики, а также кластерного анализа, теории множеств, вероятностей. Экспериментальные исследования базируются на теоретических основах их проведения. При выполнении работ применялись современные средства и методы оценки качественных параметров деталей, используемых в действующих производствах.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика типизации и результаты последовательного классификационного группирования способов бесцентрового шлифования и способов проходного бесцентрового шлифования в виде дендрограмм, визуализирующих взаимодействия их между собой, с использованием аппарата кластерного анализа, на основе критерия однородности выполнения проектных процедур.
2. Новые научно обоснованные решения по структуризации информационных моделей и частей технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования с учетом конструктивных особенностей оборудования и реального состояния средств технического оснащения.
3. Подход к назначению перечня и формализованному расчету наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования, установлению последовательности выполнения наладочных манипуляций, снижающей долю субъективных составляющих в процессе принятия решений при настройке технологической системы.
4. Метод определения пространственного расположения мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, включающий описанные зависимости, устанавливающих взаимосвязь между ними с учетом конкретных условий обработки.

5. Методическое сопровождение выполнения расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки с учетом реального состояния технологической системы, характеристик обрабатываемой поверхности и их разнонаправленным влиянием на относительную ориентацию детали на протяжении всего процесса обработки с проверкой соблюдения условия силового замыкания, как определяющей количественной характеристики при выборе правильного технологического решения.

6. Выстроенная обобщенная система составляющих сил, действующих в точках контакта, устанавливающих их взаимовлияние на направления и величины, зависимости от характеристик ведущего и шлифовального круга, скоростей вращения, параметров опорной поверхности ножа, жесткости и других параметров технологической системы.

7. Принятие обоснованных решений при выборе режимов обработки из сгенерированного множества вариантов в рамках диапазона значений, соответствующих допустимым требованиям по ориентации детали и предельным значениям сил резания на протяжении всего процесса обработки, обеспечивающих стабильное качество реализации операций проходного бесцентрового шлифования.

8. Результаты промышленных экспериментов и имитационного моделирования, практические методические материалы, автоматизированные подсистемы определения наладочных параметров и назначения рациональных режимов обработки для конкретных условий обработки.

Степень достоверности и апробация результатов научных положений, выводов и результатов, представленных в работе, подтверждается результатами проведенных экспериментов в условиях действующих производственных систем, а также на использовании современных средств измерений. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 15 научных конференциях, среди них: Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Scientific conference abstracts XVI International Forum-Contest of Students and Young

Researchers (Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 17–19 июня 2020 г.). Механика и машиностроение. Наука и практика: материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 декабря 2021 года / Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение». Инновационные технологии в обучении и производстве. XVI Всероссийской заочной научно-практической конференции (Камышин). Научное машиностроение. XV Международная научно-техническая конференция. (г. Москва, 1 ноября 2023 г.); Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты. Всероссийская научно-практической конференция (Махачкала); Актуальные проблемы станкостроения – 2023. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием (г. Пенза, 1-3 июня 2023 г.); Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А. А. Рыжкина (г. Ростов-на-Дону, 25 января 2024 г.); XXIII Всероссийская научно-техническая конференция Механики XXI века (г. Братск, 25 апреля 2024 г.).

Глава 1. Анализ и направления развития методов бесцентровой шлифовальной обработки

1.1 Современное состояние вопросов использования методов бесцентрового шлифования

Бесцентровое шлифование является высокоэффективным и универсальным технологическим процессом, его широкое применение обосновывается в современном производственном процессе обеспечением высокой точности и производительностью (таблица 1.1). В сравнении с традиционными методами обработки в центрах и патронах, бесцентровое шлифование обладает рядом преимуществ такими как: уменьшение вспомогательного времени, связанного с установкой и снятием детали; минимизация припуска на шлифование за счет симметричного распределения погрешностей геометрической формы по диаметру.

Кроме того, бесцентровое шлифование позволяет более широко применять повышенные режимы резания благодаря отсутствию прогиба детали под действием сил резания. Это достигается за счет использования схемы базирования, которая обеспечивает высокую стабильность и точность обработки. Важным аспектом является также высокая точность размеров в партии обработанных деталей, что особенно важно для серийного производства.

Требования к точности изготовления деталей, таких как подшипники, поршневые пальцы и другие компоненты, применяемые в автомобильной промышленности, характеризуются чрезвычайно высокими стандартами. В частности, параметры точности достигают уровня, соответствующего десятым долям микрометра, что предъявляет повышенные требования к технологическому оборудованию и квалификации персонала.

Таблица 1.1 – Технологические возможности методов бесцентрового шлифования

Конструктивные типы деталей	Гладкие цилиндрические и конические поверхности; ступенчатые, фасонные валы; кольца, детали подшипников; поршневые пальцы, кольца. Различные по форме и габаритным размерам детали, представляющие собой тела вращения: ступенчатые валики; гильзы; поршневые и шаровые пальцы; круглые калибры; толкатели, штифты, оси, золотники; крестовины; крупногабаритные валы; прутки; трубы. Заготовки, форма которых не позволяет им беспрепятственно проходить между кругами (болты, клапаны со стеблем или тарелкой и т.п.); детали автомобилей (шейки коленчатых и распределительных валов, поршни, поршневые пальцы, клапаны, штоки амортизаторов). Детали станков (шпиндели, пиноли, роторы электродвигателей).
Габариты характеристики обрабатываемых деталей	Диапазон типоразмеров изделий очень широк: от прутков и труб большой длины до иглолок карданных подшипников и валов различной конфигурации; тяжелые детали большого диаметра; узкие кольца. Диаметр обрабатываемого изделия до 500 мм; Длина деталей до 15 м.
Обрабатываемый материал	Сталь конструкционная углеродистая, сталь конструкционная хромистая, сталь конструкционная легированная (хромоникелевая, марганцовистая, никелевая), сталь инструментальная углеродистая, сталь инструментальная быстрорежущая, чугун ковкий (перлитный), чугун серый и отбеленный, твердый сплав, сплав алюминиевый литейный, сплав медноцинковый, бронза оловянная литейная, бронза безоловянистая, фарфор, стекло, дерево (твердая порода); сталь закаленная, жаропрочные сплавы; медь и ее сплавы, титановые сплавы.
Виды обрабатываемых поверхностей	Наружная цилиндрическая; внутренняя цилиндрическая; конические; фасонные; резьбовые; бомбинированные; шаровые.
Характеристики качества обрабатываемых поверхностей	Обеспечивает точность обработки деталей: при предварительной обработке 8-11 IT, чистовой 6-8 IT, окончательной 5-6 IT; Параметр шероховатости обработанной поверхности: предварительная обработка $Ra = 3.2-6.3$ мкм, чистовая $Ra = 0.8-3.2$ мкм, окончательная $Ra = 0.2-0.8$ мкм. Отклонение от геометрической формы – повышенный уровень относительной геометрической точности.

Наиболее значимые теоретические и методические вопросы технологического обеспечения операций, выполняемых на бесцентрово шлифовальных станках, а также с вопросами, связанными с данным видом обработки, нашли отражение в работах ученых: В.И. Слонимского, М.А.

Тамаркина, Е.С. Киселева, В.М. Шумячера, Д.Г. Евсеева, Я.М. Ашкиназия, Б.М. Бржозовского, Б.И. Черпакова, В.Н. Масленникова, В.И. Муцянка, А.Ф. Прохорова, Т.Н. Ивановой, Л.В. Худобина, З.И. Кремня. Выполненный обзор научно-технической литературы позволил представить результаты работы ученых в хронологической последовательности (таблица 1.2), которые в наибольшей степени отражают состояние вопросов в данной отрасли в настоящее время.

Таблица 1.2 – Хронологическая последовательность развития научно-технических знаний в области бесцентрового шлифования

Слонимский В.И. 1938, 1940, 1952	«Изучены теоретические основы процесса бесцентрового шлифования, дана качественная оценка его явлений». «Систематизированы и рассмотрены вопросы эксплуатации и наладки бесцентровых шлифовальных станков». «Частично проведена количественная оценка. Выявлены современные технологические возможности процесса бесцентрового шлифования и систематизированы основные материалы, необходимые для построения типовой его технологии».
Рувинов Д.Я. 1963	«Изложены основы расчета основных параметров валковых (цельных и секционных) загрузочных устройств, а также выявлены некоторые новые возможности, заложенные в них».
Муцянка В.И. 1967	«На примерах решения сложных вопросов как методологического характера, так и вопросов, связанных с непосредственным проектированием технологических процессов обработки показана рациональная наладка бесцентрово-шлифовальных станков, правильные расчеты элементов наладки и настройки отдельных узлов станков. Для облегчения практического применения рекомендаций по рациональной наладке бесцентрово-шлифовальных станков рассмотрены и проанализированы примеры обработки различных деталей, выявлены причины возникающих при обработке дефектов и способы их устранения.»
Филькин В.П. 1971	«Детально изучен вопрос формообразования, на основе этих исследований получены новые конкретные материалы по повышению точности и улучшению наладки станков, учитывающие не только геометрические, но и динамические факторы процесса бесцентрового шлифования».
Черпаков Б.И. 1970, 1973	«Проведено детальное описание устройства станков бесцентрового шлифования, их конструкция, электрические схемы и описаны схемы устройства для правок кругов. С учетом расчета траектории движения правящего алмаза.»
Прохоров А.Ф. 1976	«На основе краткого обобщения основных положений современной теории формообразования при бесцентровом шлифовании даны практические рекомендации по эксплуатации станков. Рассмотрены вопросы подготовки оборудования к работе, основные этапы наладки, особенности использования станков для обработки типовых деталей. Значительное место уделено

	дефектам при бесцентровом шлифовании, причинам их образования и методам устранения, даны некоторые рекомендации по восстановлению и наладке базовых деталей и узлов станков.»
Муцянко В.И. 1986	«Рассмотрены особенности различных методов бесцентрового шлифования, приведены описание рациональной наладки бесцентрового-шлифовальных станков и расчеты элементов наладки отдельных узлов станка, даны характеристики шлифовальных кругов и режимы шлифования, рекомендуемые для обработки различных заготовок». «Особое внимание уделено вопросам, связанным с правкой и профилированием кругов при бесцентровом шлифовании, а также причинам появления дефектов на поверхности обработанных заготовок и способам их устранения».
Ашкиназий Я.М. 2003	«Проведены исследования, учитывающие изменение усилий в точках контакта обрабатываемой поверхности изделия со шлифовальным, ведущим кругами и опорным ножом, а также позволяющие исключить влияние вибраций, связанных с дисбалансом шлифовального круга при высоких скоростях шлифования».
Бржозовский Б.М. 2010	«Предложена методология обеспечения технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке, которая заключается в рассмотрении формообразующей подсистемы как основной и оптимизации геометрических параметров по детерминированным и стохастическим моделям. Для этого создана система критериальных оценок точности обработки через параметры наладки оборудования, включающая: результирующий вектор отклонений формообразующей траектории; приведенную погрешность базирования; статистические коэффициенты исправления формы заготовок. Процесс оптимизации геометрических параметров включает формирование целевой функции на основе максиминного критерия, определение ограничений на управляемые параметры и преобразование целевой функции из безусловной в условную методом штрафных функций. Стохастические факторы, в том числе внешние возмущения, учитываются в качестве исходных данных при использовании метода статистических испытаний Монте-Карло».

В работах представленных авторов подробно описываются принципиальные схемы круглого бесцентрового шлифования (Рисунок 1.1), в том числе на проход, в которой заготовка (4) расположена между двумя кругами: шлифовальным (3) и ведущим (5) и опирается на поддерживающий нож (1). При этом подача и отвод заготовок деталей осуществляется транспортным устройством (2) [3,9,19,54,85].

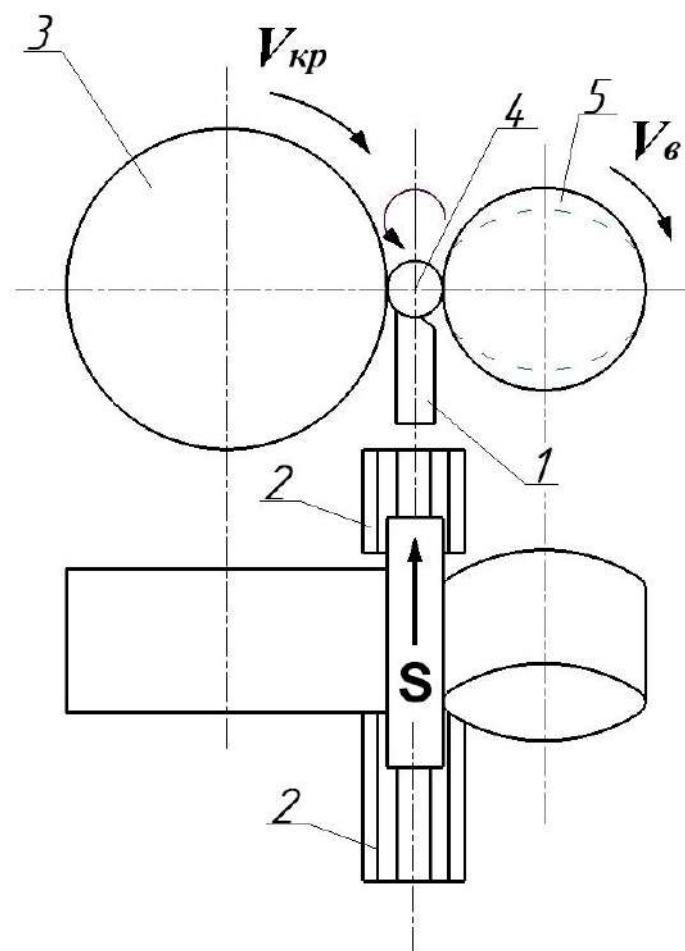
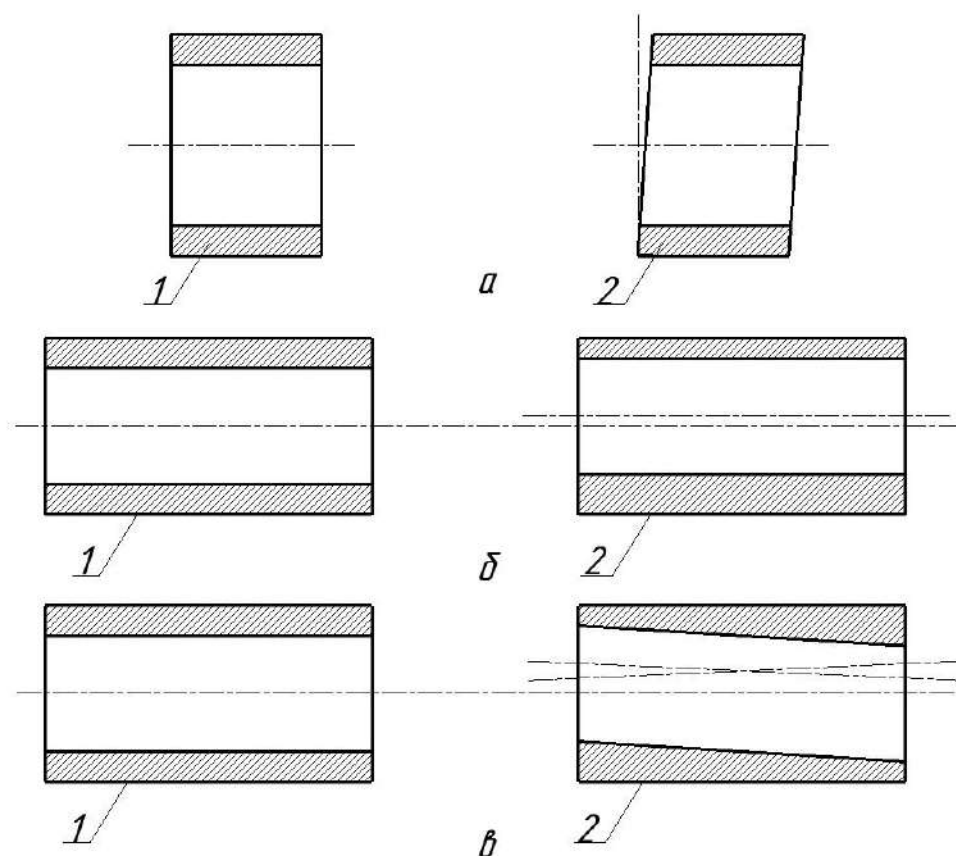


Рисунок 1.1 – Схема круглого бесцентрового шлифования

В работах отмечается, что в случае, если скорости кругов оказались бы равными, то резание не осуществлялось, поэтому круги вращаются с разной скоростью. При этом ведущий круг имеет меньшую скорость, которая равна скорости вращения детали, и составляет 25-45 м/мин [3]. Скорость шлифовального круга составляет 35-200 м/с [3].

Так же важно отметить, что в работах приводится ряд недостатков бесцентрового шлифования (рисунок 1.2) таких как:

- увеличение неперпендикулярности периферии к торцам;
- снижение concentричности наружной и внутренней поверхностей при работе по поперечному методу;
- неконцентричность, переменная по длине детали при работе по сквозному методу [66].



а – увеличение неперпендикулярности периферии к торцам; б – снижение concentricности наружной и внутренней поверхностей при работе по поперечному методу;
 в – неконцентричность, переменная по длине детали при работе по сквозному методу;
 1 – деталь до шлифования; 2 – деталь после шлифования
 Рисунок 1.2 – Недостатки бесцентрового шлифования

Подобные явления принято приписывать к случайным погрешностям. В действительности же они вызываются особенностями процесса и технологического оборудования. Воздействие на данные факторы возможны за счет соответствующей наладки станков, применением специальных приспособлений и оптимальных технологических режимов на шлифование. При их учете оказывается возможным удовлетворить требования, заданные конструкторскими параметрами [85].

1.2 Анализ структуры и схем операций бесцентрового шлифования

Процесс обработки на бесцентровых кругло шлифовальных станках включает в себя четыре основных метода: продольную подачу, применяемую для сквозного шлифования; поперечную подачу, используемую для врезного шлифования; шлифование до упора, а также метод сопряженного шлифования. Эти методы обеспечивают широкий спектр возможностей для достижения требуемых параметров точности и качества поверхности.

В современных многономенклатурных производственных комплексах наиболее развито применение двух методов: продольной подачи (сквозное шлифование); поперечной подачи (врезное шлифование). В таблице 1.3 для данных методов сформулированы на основе анализа научно-технической литературы, присущие им отличительные признаки.

Таблица 1.3 – Методы бесцентрово шлифовальной обработки

Методы	Конструктивные схемы элементов технологического оборудования	Характеристики
Метод продольной подачи – сквозное шлифование	Конструктивные схемы элементов технологического оборудования: - с поворотом ведущего круга (для гладких цилиндрических деталей: штифтов, пальцев, роликов и подшипниковых колец); - с наклоном направляющей линейки (для гладких цилиндрических деталей: штифтов, пальцев, роликов и подшипниковых колец); и т.д. Классификация по особенностям рабочей схемы: - с горизонтальным расположением линии центров кругов; - с наклонным расположением линии центров кругов; и т.д. По принципу осуществления подачи: - с поворотной осью регулирующего круга при параллельности оси шлифуемого круга и опорной поверхности направляющей линейки; - с поворотной направляющей линейкой при параллельности осей шлифуемого и регулирующего кругов; и т.д.	- Конструктивные характеристики объектов обработки. - Компоновочная схема и конструктивные особенности технологического оборудования. - Параметры и характеристики шлифовального (их) круга (ов). - Параметры и характеристики ведущего (их) круга (ов). - Виды и номенклатура конструктивных элементов технологической оснастки. - Схемы базирования.

	По принципу настройки на заданный размер: - с перемещающейся бабкой регулирующего круга; - с перемещающейся бабкой шлифующего круга; и т.д.	
Метод поперечной подачи врезное шлифование	Конструктивные схемы элементов технологического оборудования: - с ведущим кругом и радиальной подачей (для цилиндрических, конических, ступенчатых и фасонных деталей: цапф, крестовин, стержней, клапанов и сферических пальцев); - с ведущим кругом и тангенциальной подачей (для цилиндрических, конических, ступенчатых и фасонных деталей: цапф, крестовин, стержней, клапанов и сферических пальцев); ит.д. Для поперечной подачи и настройки на заданный диаметр на бесцентрово-шлифовальных станках применяют следующие способы: - перемещение ведущего круга и суппорта с опорным ножом относительно неподвижно закрепленной на станке шлифовальной бабки; и т.д.	

Стоит отметить, что при схеме шлифования по сквозному методу [3,9,19,85] характер движения детали наиболее сложный, смещаясь в рабочей зоне, она поворачивается в пространстве за счет чего ее ось не остается параллельной своему первоначальному положению. Ввиду этого глубина резания при бесцентровом шлифовании не сохраняется постоянной. Сам процесс обработки деталей бесцентровым шлифованием обеспечивается при отсутствии жесткой кинематической связи детали с элементами рабочей схемы. В отличие от способов обработки в центрах, при наружном бесцентровом шлифовании установочной базой, является сама шлифуемая поверхность, и деталь располагает большим числом степеней свободы. Для обеспечения нормального процесса резания необходимо непрерывное прижатие детали к поверхностям направляющей линейки и регулирующего круга. При этом изменение формы детали в процессе шлифования влечет за собой ее смещение в рабочей зоне [85].

Указывается [3,9,19,85], что для обеспечения уменьшения возникающей погрешности необходимо произвести снижение съема с диаметра. С этой же целью рекомендуется обработка с максимальным превышением оси детали над линией центров станка, так как это минимизирует сумму погрешностей. Податливость узлов станка и некачественная настройка оборудования приводят к увеличению погрешности. Анализируя влияние продольной геометрии и погрешностей наладки оборудования, а также ошибок при изготовлении базовых компонентов станка, можно выделить ключевые аспекты, определяющие качество формообразования. Особое внимание следует уделить организации рабочей зоны станка, в частности, обеспечению прямолинейности движения оси шлифуемой детали. Малейшие отклонения от заданной траектории движения оси детали приводят к дополнительным смещениям на шлифовальный круг, что, в свою очередь, вызывает погрешности в продольном сечении [58].

На станках с наклонным расположением линии центров [3,9,19,85] ведущий круг работает, «помогая» шлифовальному вращать деталь. Такой режим работы ведущего круга, когда направления тангенциальной составляющей силы резания совпадают, называется моторным. Но на станках с горизонтальным расположением линии центров кругов характер работы ведущего круга может меняться в зависимости от мгновенного значения составляющих силы резания. При сравнительно больших величинах составляющих силы резания деталь увлекается шлифовальным кругом во вращение. Ведущий круг вместе с опорным ножом тормозит ее. В результате деталь приобретает скорость вращения, несколько большую теоретической. Когда же величина составляющих силы резания уменьшается и становится недостаточной для увлечения детали во вращение, тогда роль ведущего круга меняется – он начинает вращать деталь. При этом меняется и знак скольжения, т. е. деталь начинает вращаться со скоростью, несколько меньшей жима, чем окружная составляющая скорости ведущего круга [85].

Ведущий круг является попеременно источником вращения детали и тормозящим элементом. На переходе от тормозного режима к моторному лежит

нулевой режим. При этом окружная сила на ведущем круге $P_{ок}$ меняет свое направление, однако изменение режима работы не влияет на направление продольного движения деталей в рабочей зоне [66].

1.3 Технические средства оснащения операций бесцентрового шлифования

К основным рабочим элементам станка для бесцентрового шлифования относят [66]: шлифующие, направляющие и ведущие. Основываясь на расположении данных элементов, при условии реализации процесса шлифования, определяется компоновка станка. Для обеспечения вращения детали ее скорость задается ведущим элементом. При этом его скорость существенно ниже скорости шлифующего элемента [85].

При наружном бесцентровом шлифовании деталь устанавливается между ведущим кругом, шлифовальным кругом и опорным ножом. Последний в свою очередь обеспечивает стабильное положение детали относительно шлифовального круга, при этом повышается качество обработки и минимизируются вибрационные процессы. В станках для внутреннего бесцентрового шлифования, это обеспечивается за счет поддерживающего, прижимного и ведущего ролика. Классификация станков с бесцентровым шлифованием построена в зависимости от типа обрабатываемой поверхности для наружного и внутреннего шлифования тел вращения.

Активное применение станков для внутреннего бесцентрового шлифования приходится на подшипниковую промышленность, для массового производства колец подшипников качения. Наружное бесцентровое шлифование осуществляется на универсальных и специализированных станках, которые различаются по конфигурации линии центров шлифовальных кругов, принципам реализации продольной подачи детали и поперечной подачи («на врезание»), а также по конструкции механизмов правки и регулировки шлифовальных кругов [85].

В фундаментальных трудах В.И. Слонимского [83,84,85] и авторов, развивающих данные научные разработки представлена комплексная классификация станков для наружного бесцентрового шлифования, учитывающая технологические особенности и конструктивные характеристики данного оборудования. В отличие от станков для внутреннего бесцентрового шлифования, которые представлены крайне ограниченным числом типов, что делает их классификацию нецелесообразной. Разделение станков на группы, подгруппы и типы осуществляется на основе ряда технологических признаков, включая конструктивные особенности, функциональные возможности и параметры настройки оборудования. Это позволяет систематизировать и структурировать многообразие существующих моделей, обеспечивая их оптимальное использование в производственных процессах.

Первый из рассматриваемых аспектов отражает специфику конструктивной схемы бесцентровых шлифовальных станков. На основе данного критерия существующие модели классифицируются на три основные группы: станки с горизонтальной компоновкой осей шлифовальных кругов; станки с наклонной компоновкой осей кругов; станки с вертикальной компоновкой осей кругов [85].

Следует отметить, что данная классификация не охватывает все релевантные параметры, которые существенно влияют на эксплуатационные характеристики и функциональные возможности оборудования [85].

К числу таких параметров относятся: принцип реализации продольной подачи при обработке сквозных деталей; метод настройки станка на заданный размер шлифуемой заготовки [85].

В контексте принципа реализации продольной подачи можно выделить следующие подгруппы станков: Р — станки с поворотной осью регулирующего круга, при условии параллельности оси шлифуемого круга и опорной поверхности направляющей линейки; Л — станки с поворотной направляющей линейкой, при условии параллельности осей шлифующего и регулирующего кругов; 0 — станки

с возможностью одновременного поворота осей, шлифующего и регулирующего кругов.

Данная классификация представляет собой комплексное решение, учитывающее ключевые конструктивные особенности и функциональные параметры бесцентровых шлифовальных станков, что позволяет более точно оценить их эксплуатационные возможности и области применения. В контексте настройки на заданный размер, что является ключевым аспектом при шлифовании сквозным методом, можно выделить различные типы станков в зависимости от того, какие органы осуществляют данный процесс. В данном контексте следует рассмотреть следующие категории оборудования:

1. Станки с перемещающейся бабкой регулирующего круга, где система настройки обеспечивает точную корректировку размера посредством перемещения бабки, что позволяет осуществлять высокоточный контроль за параметрами обработки.

2. Станки с перемещающейся бабкой шлифующего круга, в которых акцент делается на регулировку положения шлифовального элемента, что позволяет оптимизировать процесс шлифования и достигать требуемой точности.

3. Станки с перемещающимися обеими бабками, представляющие собой наиболее гибкую и универсальную категорию оборудования, позволяющую осуществлять комплексную настройку и адаптацию под различные условия и задачи обработки [85].

Каждая из вышеупомянутых конфигураций станков обладает уникальными характеристиками и функциональными возможностями, что позволяет выбрать оптимальное решение в зависимости от специфики производственного процесса и требований к качеству конечного продукта [85].

В работах Б.М. Бржозовского [13] связанных с динамикой управления бесцентрово шлифовального оборудования отмечается, что основные узлы универсальных и специализированных бесцентровых шлифовальных станков демонстрируют определенные различия, которые, однако, не носят

принципиального характера. Ключевым аспектом является уровень автоматизации и специализации отдельных компонентов, таких как подвижные или неподвижные шлифовальная и ведущая бабки, а также суппорт ножа. Особое внимание заслуживает положение центра заготовки относительно линии центров шлифовального и ведущего кругов, что является критически важным параметром для обеспечения точности и качества обработки.

Отмечается, что станки данного типа обладают узлами, выполняющими аналогичные функции, что позволяет широко применять агрегатно-модульный принцип их построения [4]. Этот подход охватывает различные подгруппы станков, включая круглошлифовальные, внутришлифовальные и другие [34,83,84,85], обеспечивая унификацию и стандартизацию конструктивных решений. Таким образом, модульность конструкции способствует повышению гибкости и адаптивности оборудования к разнообразным технологическим требованиям [83,84,85].

Шлифующий и регулирующий круги современных станков обычно представляют собой абразивные инструменты, отличающиеся друг от друга материалом зерна и связки, зернистостью, твердостью и номером структуры. Иногда применяются стальные, чугунные, пробковые и другие регулирующие круги. В отдельных случаях шлифующий и регулирующий круги ничем не отличаются друг от друга. Как следствие изложенного, первой задачей является определение причин, по которым резание производится шлифующим, а не регулиющим кругом, в то время как оба эти круга способны производить резание [85].

Вследствие разнообразия технологических проблем, решаемых бесцентровым шлифованием, вопрос об удовлетворительном подборе круга является серьезной производственной задачей. Шлифовальный круг — это не универсальный режущий инструмент. Доброкачественный круг может оказаться негодным, если его действительная характеристика не соответствует условиям работы [85]. Правильно выбранный круг способен длительно работать без правки.

Это экономит время и сокращает затраты на обработку. Шлифовальные круги определяются: 1) геометрической формой и размерами; 2) родом и сортом абразивного материала; 3) зернистостью; 4) материалом связки; 5) твердостью; 6) структурой [27,29,32,55,56,104].

1.4 Технологическая подготовка операций бесцентрового шлифования

На практике технологические режимы обработки устанавливаются на основе нормативов, научно обобщающих опыт заводов и исследовательских организаций по шлифованию разнообразных материалов кругами различных характеристик. Очевидно, что в нормативах не учтены все технологические особенности, имеющие место при обработке той или иной детали. К тому же технология обработки непрерывно совершенствуется. Вместе с этим повышается качество кругов и изменяются режимы шлифования. Поэтому необходимо критически использовать нормативы, исправляя их в соответствии с конкретными технологическими задачами и достижениями передовых рабочих [85].

Режимы резания и инструмент (абразивные круги) выбирают в зависимости от типа обрабатываемой детали, ее материала, требуемой точности и шероховатости обработанной поверхности. Большое значение при выборе режимов резания имеет подбор характеристики шлифовального круга. Ниже приводятся соответствующие общие рекомендации [2,9]. Детали из вязкого материала с большой прочностью и твердостью, например, из конструкционных, легированных и инструментальных сталей, термообработанных, также из безоловянистой бронзы, шлифуют обычно кругами из окиси алюминия. Детали из мягких, а также твердых и хрупких материалов, например, из чугуна, специальных сплавов, меди, латуни, алюминия, металлокерамических твердых сплавов обрабатывают кругами из карбида кремния. Кристаллы этого материала более хрупки, чем окись алюминия, легче разрушаются и обеспечивают хорошее резание и большой съем металла [66].

Для работы на бесцентровом шлифовальном станке требуется выбрать значения: скорости регулирующего круга; угла наклона оси регулирующего круга или направляющей линейки; припуска, снимаемого за проход.

Перечисленные факторы являются элементами режима и в известной мере характеризуют производительность процесса. Для обеспечения проведения обработки заготовки с помощью наружного шлифования по сквозному методу круги сближаются по мере их износа:

$$t_{\text{факт.}} = t_{\text{ном.}}, \quad (1)$$

где $t_{\text{факт.}}$ — припуск, фактически снимаемый за проход;

$t_{\text{ном.}}$ — величина припуска, которую необходимо снять за проход.

Величина действительной минутной продольной подачи (в м/мин):

$$v_{\text{и.о}} = \pi D_{\text{р.к}} n_{\text{р.к}} \sin \alpha \beta_2 = v_{\text{р.к}} \sin \alpha \beta_2, \quad (2)$$

где $D_{\text{р.к}}$ — диаметр;

$n_{\text{р.к}}$ — число оборотов в минуту; регулирующего круга

α — угол наклона оси;

β_2 — коэффициент осевого скольжения.

Приближенно $\sin \alpha = 0,01745 \alpha$ и пренебрегая скольжением, можно пользоваться формулой:

$$v_{\text{и.о}} = 17,4 v_{\text{р.к}} \alpha \text{ мм/мин} \quad (3)$$

Продольная подача за один оборот детали:

$$S_0 = \pi d_{\text{и}} \beta_2 \sin \alpha, \quad (4)$$

т. е. исследователями делается предположение о независимости от скорости регулирующего круга и возрастает подача в прямой связи с углом его наклона и диаметром детали ($d_{\text{и}}$). В целях установления режима резания необходимо учитывать не только данные параметры, но и диаметр шлифующего круга. В

таблице 1.4 приведены обобщенные ориентировочные данные по величинам припусков на наружное бесцентровое шлифование гладких цилиндрических деталей различных длин и диаметров, наиболее часто используемые в практике. При установлении величины припуска необходимо учитывать масштаб производства, а также точность, чистоту и характер предварительной обработки (включая термическую). Очевидно, более точной и качественной предварительной обработке должны соответствовать меньшие припуски на шлифование. Если черновое шлифование производится до термической обработки детали, припуск следует увеличивать по сравнению с табличным, учитывая при этом соотношение диаметра и длины деталей, возможность проведения правки после термической обработки и т. п. [85].

Таблица 1.4 – Ориентировочные значения припусков на бесцентровое шлифование незакаленных и закаленных деталей

Диаметр шлифуемой поверхности в мм	Длина шлифуемой детали в мм					
	до 50	50-100	100-250	250-500	500-750	750-1000
	Припуск на диаметр в мм					
3	0,10-0,13 0,13-0,15	0,10-0,13 0,13-0,17	0,12-0,15 0,14-0,18	0,12-0,15 0,15-0,20	0,13-0,17 0,15-0,20	0,15-0,20 0,17-0,22
10	0,13-0,17 0,15-0,20	0,13-0,18 0,17-0,22	0,15-0,20 0,20-0,25	0,17-0,22 0,22-0,27	0,20-0,25 0,25-0,30	0,20-0,25 0,25-0,30
18	0,17-0,23 0,18-0,25	0,18-0,25 0,20-0,27	0,20-0,27 0,25-0,32	0,20-0,28 0,28-0,35	0,20-0,30 0,30-0,37	0,20-0,30 0,30-0,37
30	0,20-0,28 0,20-0,30	0,20-0,30 0,23-0,33	0,22-0,32 0,28-0,38	0,23-0,33 0,32-0,42	0,25-0,35 0,35-0,45	0,30-0,40 0,35-0,45
50	0,25-0,33 0,28-0,38	0,25-0,35 0,30-0,40	0,27-0,37 0,35-0,45	0,28-0,38 0,40-0,50	0,30-0,40 0,45-0,55	0,35-0,45 0,50-0,60
120	0,30-0,38 0,35-0,45	0,30-0,40 0,37-0,47	0,32-0,40 0,40-0,45	0,33-0,44 0,43-0,55	0,35-0,47 0,55-0,65	0,50-0,52 0,60-0,75

180	0,33-0,43 0,45-0,55	0,35-0,45 0,47-0,60	0,38-0,50 0,50-0,65	0,40-0,53 0,55-0,70	0,42-0,57 0,65-0,80	0,45-0,60 0,75-0,90
Примечания: 1. В верхней строке графы для сырых деталей, в нижней - для закалённых. 2. При черновом шлифовании до термической обработки суммарный припуск следует увеличить в 1,5 раза против табличных данных. 3. Величина допуска принимается в зависимости от характера предварительной обработки (3-5й классы точности ОСТ).						

При оценке производительности наиболее часто приводятся подходы на основе использования характеристик показателей съема металла в единицу времени на единицу высоты шлифовального круга в см³/мин -см или на 1 кВт эффективной мощности круга q в см³/мин*см или на 1 кВт. Съем металла может быть выражен также в граммах, тогда соответственно q будет иметь размерность г/мин*см или г/мин*кВт. [66]. Для проходных станков:

$$q = \frac{\pi d t s_0}{100B} \quad (5)$$

Или:

$$q = \frac{\pi d t s_0}{1000N} \text{ см}^3/\text{мин} \cdot \text{кВт} \quad (6)$$

Для врезных станков:

$$q = \frac{\pi d L s_{\pi}}{200B} \text{ см}^2/\text{мин} \cdot \text{см} \quad (7)$$

Или:

$$q = \frac{\pi d L s_{\pi}}{2000N} \text{ см}^3/\text{мин} \cdot \text{кВт}. \quad (8)$$

Для внутришлифовальных станков:

$$q = \frac{\pi d L s_{\pi}}{100B} \text{ см}^3/\text{мин} \cdot \text{см} \quad (9)$$

Или:

$$q = \frac{\pi d L s_{\pi}}{1000 N} \text{ см}^3/\text{мин} \cdot \text{кВт}. \quad (10)$$

где N - эффективная мощность круга, кВт. Для станков, работающих на проход и имеющих постоянную высоту кругов, эта характеристика может выражаться в г/мин или см³/мин. Зная такую характеристику для каждой модели станка отдельно для чернового и для чистового режимов обработки конкретной детали, можно легче выбирать режимы обработки при переналадке станка. Например, при обдирочном шлифовании прутков на станке СЛ501М кругами 15А40С1 К получают параметры шероховатости поверхности $R_z = 20 \div 10$ мкм, $R_a = 2,5 \div 1,25$ мкм при удельном съеме металла 15 г/мин*кВт.

С учетом этой характеристики устанавливают режимы обработки для прутков различных диаметров, выбирая соответственно глубину шлифования и величину осевой подачи [66]. Скорость шлифования определяется по формуле:

$$v_{\text{ш}} = \frac{\pi D_{\text{ш}} n_{\text{ш}}}{1000 \cdot 60} \text{ м/с} \quad (11)$$

или по номограмме (рис. 1.3). Обычная скорость шлифования составляет 35 м/с. Однако на бесцентровых специализированных станках применяется повышенная скорость шлифования: на врезных станках – 50 – 60 м/с, на проходных станках 45 – 60 м/с, на внутришлифовальных 50 – 70 м/с. [66].

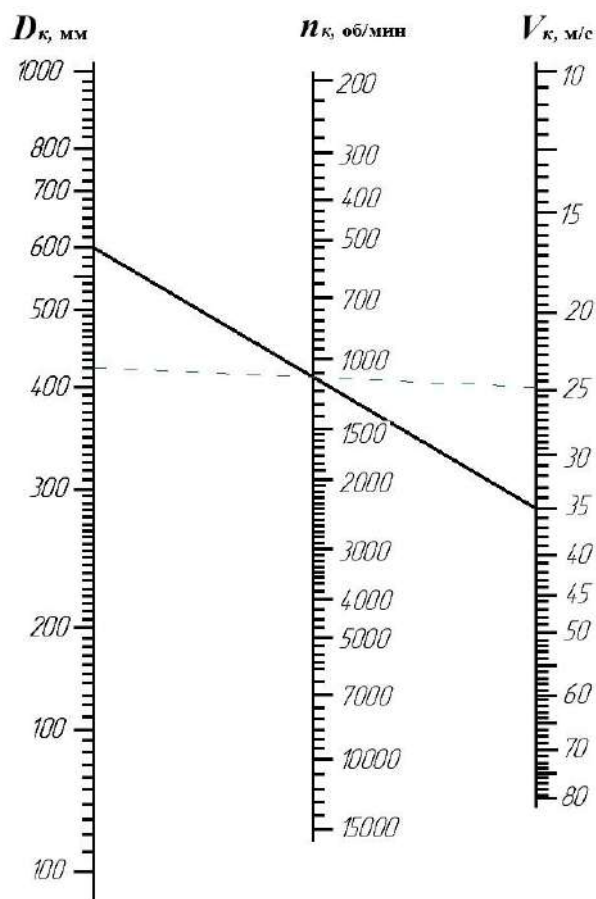


Рисунок 1.3 – Номограмма для определения скорости шлифовального круга

Зная характеристику станка q и необходимую осевую подачу s_0 , находится t . По известным и устанавливают скорость вращения детали из формулы $s_0 = v_d \sin \alpha_s$ – угол наклона α_s , ведущего круга. Угол α_s , выбирается до 3° , так как в этом случае легче сформировать зону шлифования. Скорость детали v_d должна выбираться в пределах 20-60 м/мин и корректироваться при шлифовании с целью получения заданной величины некруглости обрабатываемой детали [66].

Частоту вращения ведущего круга находят по формуле:

$$n_B = \frac{1000v_d}{\pi D_d}, \quad (12)$$

а частоту вращения торцевой опоры для станков с базированием детали на жестких опорах – по формуле:

$$n_{т.о} = \frac{1000v_d}{\pi d}. \quad (13)$$

При шлифовании важным условием является применение СОЖ, обладающие специфическими свойствами [71,101]. Функциональные свойства СОЖ охлаждать, смазывать, смывать (препятствовать засаливанию), обладать адсорбционной способностью. Основные эксплуатационные свойства СОЖ: не оказывать действия на износ и стойкость абразивного инструмента; снижать шероховатость обработанных поверхностей; уменьшать температуру зоны резания, режущего инструмента и обрабатываемой детали; уменьшать силу и мощность резания.

Степень воздействия СОЖ на процесс шлифования зависит не только от их свойств, но и от метода подачи. Существует несколько методов подачи СОЖ для бесцентрово шлифовальных станков в зону резания. Струйный метод подачи СОЖ осуществляется под давлением 0,3-1,5 кгс/см² с расходом до 400 м/мин из расчета 5-8 м/мин на каждые 10 мм высоты круга. При обработке деталей большого диаметра, высокоточном или высокопроизводительном шлифовании (при минутном съеме металла более 0,5 кг) для уменьшения тепловых деформаций детали полезно применять дополнительное устройство для подвода СОЖ в зону резания снизу [66].

Вопросы, связанные с рассмотрением экономических аспектов выполнения операций механической обработки, основываются на анализе их производительности и выполнения нормирования. Бесцентровое шлифование имеет свои специфические особенности таких расчетов, обусловленные структурной организацией операций и компоновочным построением оборудования [1,6, 32, 57,61,67,70,89]

Так, при рассмотрении операций, выполняемых способом проходного бесцентрового шлифования, возможны варианты расчетов при реализации обработки отдельных деталей или по сквозному методу, для которого основное время определяется:

$$T_o = \frac{l \cdot n_{шт.} + H}{v_o \cdot n_{шт.}} i \cdot k , \quad (14)$$

где: l - длина шлифуемой детали [мм];

$n_{шт.}$ - число деталей в партии, шлифуемых непрерывным потоком (без переналадки станка);

H - высота круга [мм];

i - число проходов, осуществляемых без изменения режима резания [мм];

k - коэффициент, учитывающий скольжение в разрывах в потоке деталей;

v_o - теоретическое значение осевой составляющей скорости детали [мм/мин].

Таким образом, в расчете времени, непосредственно связанного с обработкой детали, оказывают влияние такие факторы, как учет коэффициента скольжения, зависящего от мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки и возникающих в этих местах сил, а также разрывы в потоке деталей, размеры которых зависят от сложного и неравномерного движения детали в рабочей зоне станка. При реализации данного метода вспомогательное время полностью перекрывается основным. При нормировании сквозным методом операций проходного бесцентрового шлифования в связи с его особенностью исключаются вспомогательные времена.

Очевидным обстоятельством, приведенным в научной и справочной литературе, является сравнительно высокое количество времени, затрачиваемое на процесс наладки станка, которое входит в подготовительно-заключительное время. Поэтому приводится в качестве наиболее показательного фактора для оценки эффективности процесса бесцентрового шлифования длительность наладки станка.

Обобщая известные исследования и нормативные материалы можно выделить по степени трудоемкости виды наладок и представить укрупненный перечень выполняемых в их рамках наладочных операций (рис. 1.4)



Рисунок 1.4 – Виды наладок по трудоемкости операций бесцентрового шлифования

Грамотная организация производства позволяет выполнить правильный выбор значений отдельных элементов наладки, приводящих к сокращению ее выполнению. Например, сортировка деталей, требующих бесцентрового шлифования, по материалам, размерам и подачи партий деталей на обработку в определенной последовательности освобождают от необходимости повторного выполнения наладок, близким по значениям заготовок.

1.5 Подходы и приемы при наладке оборудования

Для проведения работ по наладке станка для бесцентрового шлифования необходимо наличие: технологической карты; чертежа заготовки; чертежа обработанной детали.

Обязательным требованием к содержанию технологической карты относят наличие следующих параметров [1,89,90,91]: эскиз обработанной детали; материал изделия; твердость обрабатываемой поверхности; вес изделия; характеристики абразивных кругов и их размеры; марка и характеристика правящего инструмента; вспомогательный и измерительный инструменты; величина съема металла с диаметра – $2t$ (мм); скорость шлифования (м/с); число оборотов шлифовального и ведущего кругов (об/мин); угол разворота шпинделя ведущего круга в вертикальной плоскости (для проходных станков в угловых град); скорости рабочих поперечных (осевых) подач (мм/мин); штучное время обработки одного изделия – $T_{шт}$ (с); параметры и минутный расход смазочно-охлаждающей жидкости.

Чертежи заготовки и готового изделия должны содержать следующую информацию: материал и твердость заготовки; точность выполнения базовых элементов заготовок; допуск на диаметр обрабатываемой поверхности; требования к геометрическим отклонениям; шероховатость поверхности до и после обработки.

Основываясь на данной информации возможно осуществление первоначальной наладки станка, которая является трудоемким и кропотливым процессом. Не смотря на разницу в наладке станков с наружным и внутренним бесцентровым шлифованием последовательность выполнения наладочных операций является идентичной [3,58,59,66,85] установка базирующих элементов и зоны обработки для получения наилучших геометрических параметров детали; расположение устройств загрузки-выгрузки; правка шлифовального круга [21]; отладка автоматического цикла станка; установка базирующих элементов.

В известных теоретических исследованиях существуют различные способы проведения работ по наладке станков с бесцентровым шлифованием. В работах и нормативных документах [3,58,59,66,85] описан способ, в котором основным наладочным параметром, обеспечивающим круглость детали при проходном бесцентровом шлифовании, является положение центра обрабатываемой детали над линией центров станка (размер h). Эта величина зависит от ряда факторов,

таких как вид обработки, геометрия шлифовального ($D_{ш}$) и ведущего кругов ($D_{в}$), диаметр обрабатываемой детали. Ввиду изменения высоты h необходимо применение направляющих ножей, имеющих разные углы скоса λ . Как правило на практике часто используемыми являются ножи с $\lambda = 30^\circ$, но для обеспечения обработки деталей с правильной круглостью поперечного сечения, это значение не является оптимальным для наладки станка. Для бесцентровых шлифовальных станков имеющих диаметры кругов в диапазоне от 350 до 400 мм для ведущего круга и от 500 до 600 мм для шлифовальных применяется формула для определения высоты заготовки над линией центров:

$$h = \frac{1}{2}(D_{ш} + d) \sin \alpha. \quad (15)$$

При этом значение угла α определяют в зависимости от вида обработки заготовки:

- 1° - черновое шлифование;
- $4,5-5^\circ$ - получистовое;
- $3 - 3,5^\circ$ - чистовое.

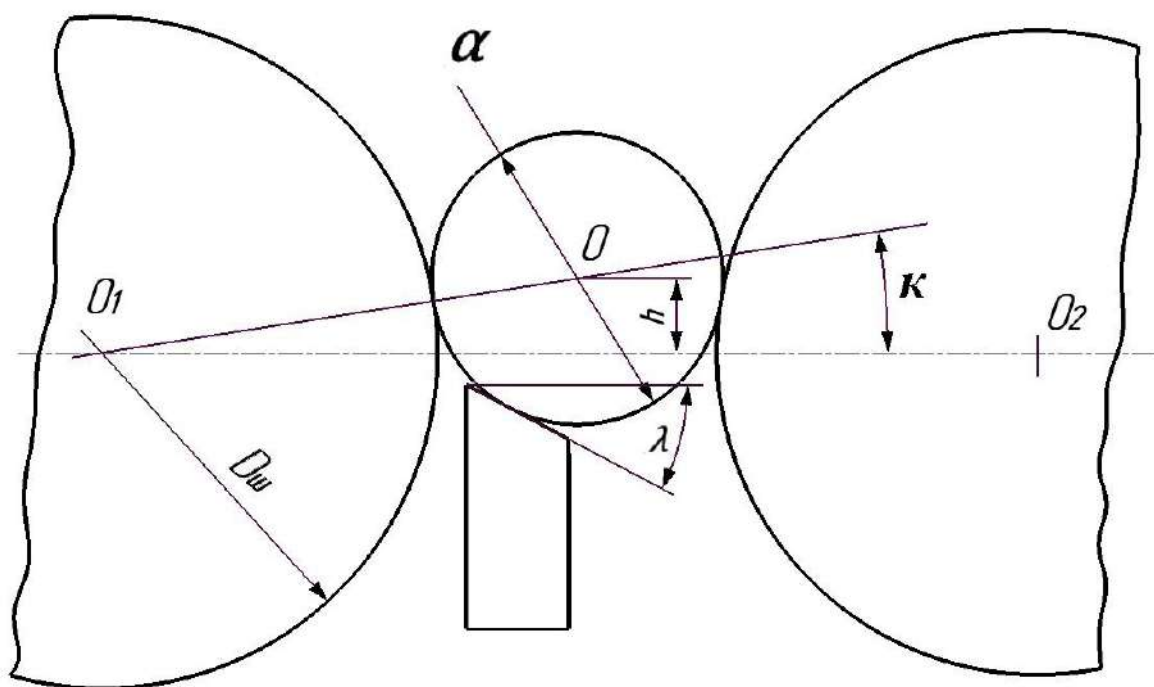


Рисунок 1.5 – Схема расчета высоты заготовки над линией станка

Рекомендуемые величины угла скоса ножа и высоты h указаны в справочной информации. Установку ножа по высоте определяют расстоянием от базовой плоскости суппорта ножа до линии центров станка – h_1 рассчитывая по формуле [50]:

$$H = h_1 + h + \frac{1}{2}d \text{ мм.} \quad (16)$$

В работе [84,85] способ наладки сформулирован следующим образом. Обрабатываемую заготовку устанавливают на нож и ведущий круг на выходе из зоны шлифования, затем с помощью глубиномера выставляют нож в вертикальной плоскости на требуемую высоту H . Операцию повторяют со стороны входа детали в зону обработки. Точность установки ножа по высоте 0,05 мм. Это первоначальное положение ножа проверяют и корректируют после правки ведущего круга (рис. 1.6) [50].

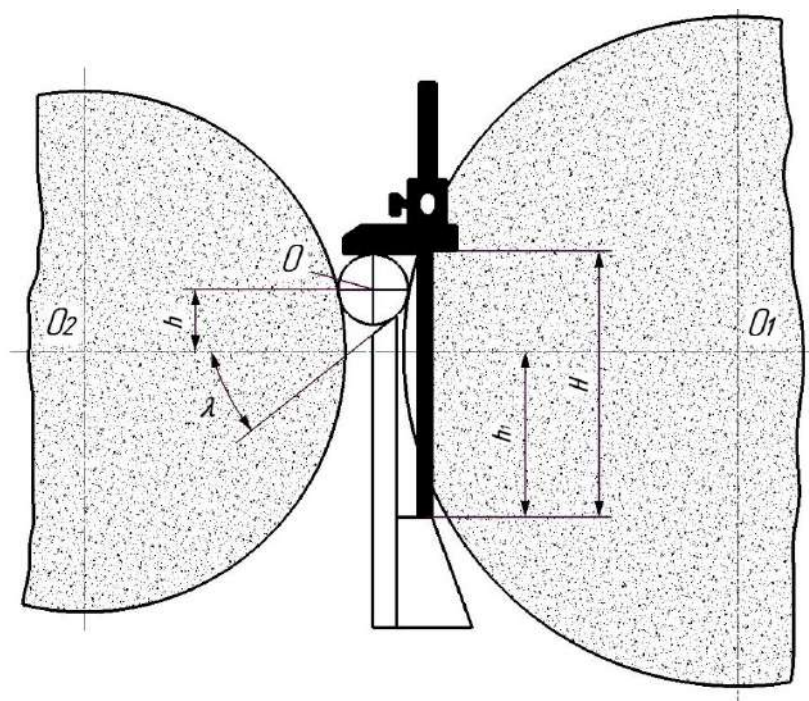


Рисунок 1.6 – Схемы установки заготовки над линией центров станка

При наладке станка определенное положение детали в рабочей зоне обеспечивается проведением ряда наладочных операций, а именно: установкой направляющей линейки по высоте; установкой направляющей линейки по ширине; установкой боковых направляющих планок, обуславливающей соответствующее направление входа и выхода деталей из рабочей зоны.

Направляющая линейка и боковые направляющие планки монтируются в поддерживающем приспособлении. Тип поддерживающего приспособления выбирается в зависимости от применяемого метода шлифования и конфигурации деталей. [84,85]

Установка направляющей линейки по высоте на большинстве станков производится с помощью специальных мерных подкладок 6 (рис. 1.7), укладываемых в паз приспособления.

Предварительно, в зависимости от диаметра детали 1 и принятого значения h , рассчитывается величина H_1 по формуле, отличной для каждой конструкции станка.

В общем случае эта формула имеет вид:

$$H_1 = A \pm h + \frac{d_{\text{и}}}{2} \text{ мм.} \quad (17)$$

Здесь A — высота расположения линии центров кругов над базовой плоскостью для установки поддерживающего приспособления, мм. Для станка 3181 величина $A = 213,5$ мм для станка 3180 $A = 222$ мм.

При установке линейки 7 по высоте удобно пользоваться штангенрейсмусом (рис. 1.7). Его основание располагается обычно на базовой плоскости 5 со стороны регулирующего круга 3. Мерительная губка штангенрейсмуса поднимается по шкале до отметки, равной H_1 .

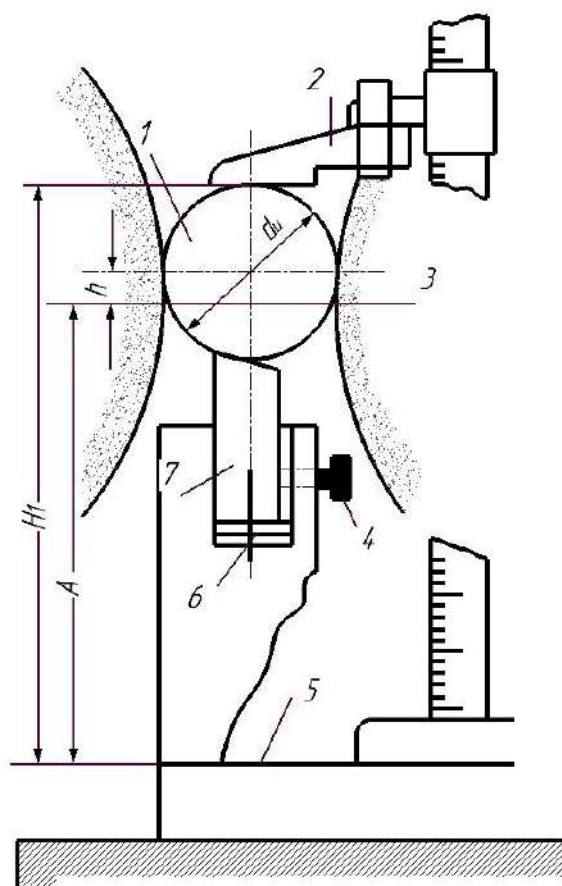


Рисунок 1.7 – Установка оси детали над линией центров кругов

Необходимо, чтобы затяжка винтов 4 производилась равномерно. Приемы проверки высоты установки линейки в пояснениях не нуждаются [85].

Направляющая линейка в процессе наладки станка устанавливается на различных расстояниях от режущей поверхности шлифующего круга. Ее положение определяется зазором с (рис. 1.8), который для линейек стандартного типа измеряется отрезком прямой, перпендикулярной к двум вертикальным плоскостям. Одна из них касательна к шлифующему кругу, а вторая проходит через рабочую кромку направляющей линейки.

При наладке, применительно к станкам типа ГР-1, установка зазора с производится перемещением нижних салазок бабки регулирующего круга, для чего поворотом рукоятки эти салазки освобождаются от скрепления со станиной, а верхние салазки скрепляются с ними поворотом рукоятки [83,84,85]. В процессе

шлифования деталь вместе с регулирующим кругом и направляющей линейкой подается на шлифующий круг, чем величина зазора с несколько уменьшается, в зависимости от величины припуска, снимаемого за проход, и числа проходов.

За счет износа шлифующего круга, тем более при работе его в области самозатачивания, зазор с увеличивается, но это не может быть учтено при наладке. Зазор с зависит: от диаметра шлифуемой детали; ширины опорной поверхности направляющей линейки и угла ее скоса; высоты установки оси детали над линией центров кругов [50]; диаметра шлифуемого круга. Доказывается, что (рис. 1.8):

$$c_0 = \sqrt{\frac{1}{4}(D_{\text{шл.}} + d_{\text{и}})^2 - h^2} - \frac{1}{2}(D_{\text{шл.}} + d_{\text{и}} \sin \varphi) - c. \quad (18)$$

Здесь c_0 — расстояние от рабочей кромки до линии контакта детали с опорной поверхностью направляющей линейки;

$D_{\text{шл.}}$ — диаметр шлифующего круга;

$d_{\text{и}}$ — диаметр детали;

φ — угол скоса опорной поверхности направляющей линейки.

Так как:

$$\frac{1}{4}(D_{\text{шл.}} + d_{\text{и}})^2 \gg h^2, \quad (19)$$

то, пренебрегая влиянием h на результаты вычисления, из формулы (19) получим:

$$c = \frac{d_{\text{и}}}{2}(1 - \sin \varphi) - c_0. \quad (20)$$

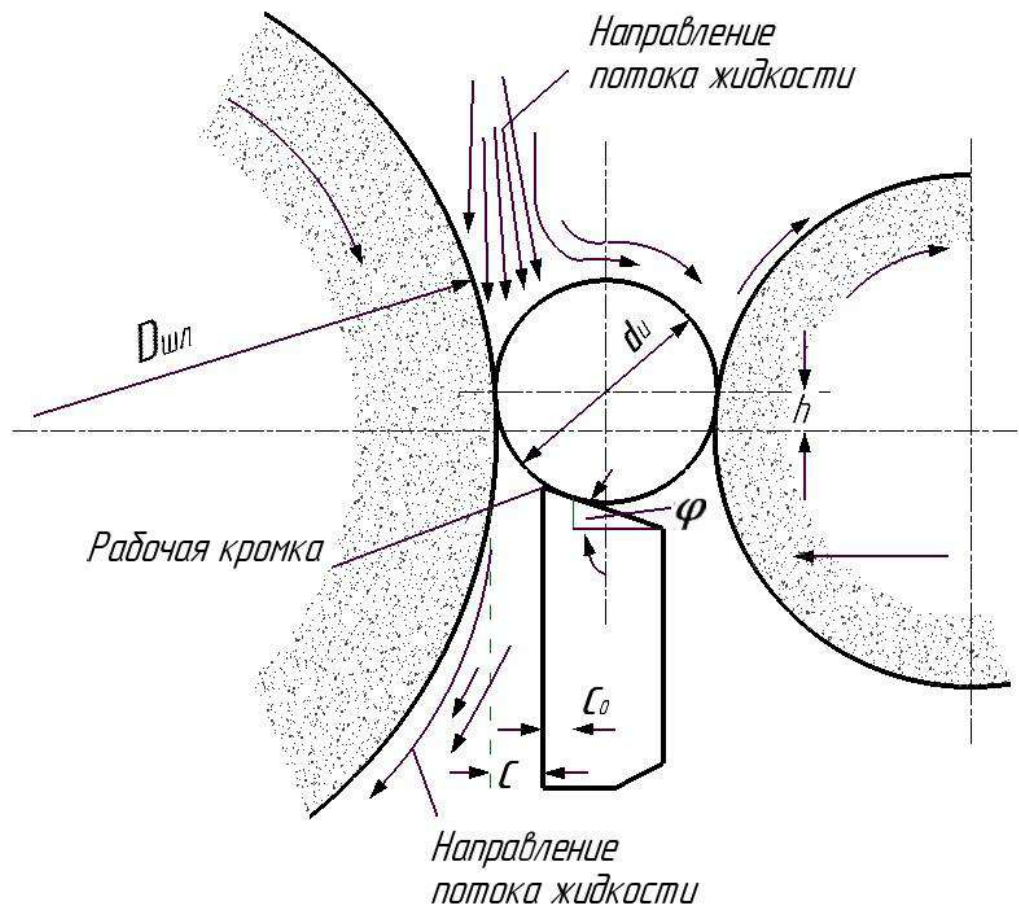


Рисунок 1.8 – Установка направляющей линейки по ширине

Проводя анализ формулы (20), мы видим, что для значений $d_{и}$ $1,5 \div 12$ мм величина зазора определяется в основном соображениями геометрического порядка. Для больших диаметров имеется возможность регулирования величины зазора c и тем самым живого сечения щели между шлифующим кругом и направляющей линейкой, через которую проходит поток охлаждающей жидкости, несущей стружку, разрушенную связку и зерна абразива (рис. 1.8).

При $\varphi = 0$ формула (20) принимает вид:

$$c = \frac{d_{и}}{2} - c_0. \quad (21)$$

Изменение величины зазора c вызывает необходимость перемещения линии контакта деталь — направляющая линейка по ширине последней. Место расположения этой линии контакта (c_0) существенно.

Приведенный выше анализ исследований объясняет выводы ученых [3,9,58,85,99] о влиянии наладки на изменение геометрической формы поперечного сечения заготовки при бесцентровом шлифовании. Несмотря на это, даже геометрически правильно налаженный станок дает неудовлетворительные результаты по круглости. Разные данные по точности поперечного сечения получаются и на станках различных типов. Это объясняется особенностями процесса бесцентрового шлифования, которые заключаются в том, что отсутствует жесткая кинематическая связь детали с базирующими элементами станка и шлифовальным кругом, образующими упругую рабочую схему станка [50]. Нормальное протекание процесса шлифования обеспечивается непрерывным силовым прижатием детали к базирующим элементам. Базирование осуществляется по обрабатываемой поверхности и деталь имеет несколько степеней свободы. При возникновении возмущающих сил, например, из-за огранности заготовки, биения кругов, внешних источников и т. п., изменяется относительное положение детали и элементов упругой системы станка, деталь смещается в направлении возможных перемещений. Это приводит к изменению воздействия упругой системы на рабочие процессы [13]. На первоначальных этапах наладки станков рекомендуется определять зоны и запас устойчивости для оптимальных геометрических наладок с помощью построения амплитудно-фазово-частотных характеристик (АФЧХ) динамической системы [13].

На основании представленной информации сформировано структурное описание известных принципов технологического обеспечения операций, выполняемых на бесцентрово шлифовальных станках (таблица 1.5) [50].

**Таблица 1.5 – Структурное описание известных принципов
технологической подготовки операций бесцентрового проходного шлифования**

Общие подходы наладки операций проходного бесцентрового шлифования	Процесс настройки станка можно разделить на два основных этапа: подготовительный и заключительный. На подготовительном этапе происходит настройка станка таким образом, чтобы обеспечить правильное расположение его основных элементов и механизмов. Также на этом этапе определяются оптимальные параметры и режимы работы станка путём пробного шлифования деталей. После этого станок запускается, и начинается настройка на заданный размер обрабатываемой детали. При этом важно обеспечить стабильность положения детали во время настройки, чтобы компенсировать износ шлифовального круга. Следует отметить, что геометрические параметры настройки влияют на формирование поперечного сечения при бесцентровом шлифовании. Особенностью этого процесса является отсутствие жёсткой кинематической связи детали с базовыми элементами станка и шлифовальным кругом, что создаёт упругую рабочую среду станка. Настройка станка — это сложный и трудоёмкий процесс. Ведущий круг вместе с опорным ножом обеспечивают базирование детали. Ведущий круг имеет форму гиперболоида со смещённой горловиной, образующая которого не параллельна рабочей плоскости опорного ножа и оси шлифовального круга. Для проверки организации рабочей зоны используется эталонный валик, диаметр которого соответствует диаметру обрабатываемой детали.
Методические принципы наладки операций проходного бесцентрового шлифования	В зависимости от диаметра детали и выбранного метода шлифования, определяется высота установки оси детали относительно линий центров. В соответствии с технологическим процессом, бесцентрово-шлифовальный станок настраивается на предварительное, чистовое или комбинированное шлифование. Высота превышения центра детали h зависит от диаметра детали и определяется по номограмме. Силы резания обеспечивают более плотное соприкосновение деталей с поверхностью опорного ножа, что снижает вибрацию детали во время обработки. Номограмма позволяет определить высоту установки оси детали над линией центров h и величину смещения h_0 державки с правящим инструментом по известным значениям диаметра обрабатываемой детали d и диаметра ведущего круга D_v.
Рекомендации по правке кругов на операциях проходного	Положение державки с инструментом для правки определяется на основе правильного расположения детали в рабочей зоне. Для этого необходимо, чтобы линии контакта инструмента и детали при обработке с ведущим кругом совпадали.

бесцентрового шлифования	Правка ведущего круга на однополостный гиперboloид вращения не обеспечивает линейный контакт обработанной заготовки с рабочей поверхностью ведущего круга. В связи с этим необходимо вносить изменения в рассчитываемые для правки параметры элементов настройки. Форма однополостного гиперboloида, получаемая при правке ведущего круга, ось которого повёрнута относительно траектории движения алмаза, не может обеспечить линейный контакт с обрабатываемой деталью по прямой линии. Ведущий круг получает форму гиперboloида со смещённой горловиной. Если алмаз сместить вверх, то горловина гиперboloида сместится в сторону входа детали в зону шлифования. Из-за разницы скоростей вращения и соответственно скоростей осевой подачи происходит разрыв потока шлифуемых деталей. Если алмаз сместить вниз, то гиперboloид принимает форму обратного конуса и образует подпольные детали в потоке. Точные формулы для расчёта параметров настройки ведущего круга сложны и неудобны для практического применения. Кроме того, в этих формулах используются угловые и линейные величины с точностью до минут и микрон. С такой точностью невозможно реализовать параметры настройки. Ведущий круг с формой участка произвольного гиперboloида всегда можно расположить относительно прямолинейного потока обрабатываемых деталей таким образом, чтобы его поверхность аппроксимировала идеальную форму, совпадая с ней в трёх сечениях. Можно обеспечить необходимый угол и расстояние от торца круга до горловины сечения, комбинируя величины углов поворота в каждой из плоскостей. Операция правки шлифовального круга является важной. Она определяет правильность распределения металла при его прохождении через зону шлифования.
Методические предложения по установке опорного ножа на операциях проходного бесцентрового шлифования	Качество обработки деталей зависит от множества факторов, среди которых: - высота установки ножа относительно оси шлифовального круга; - правильность установки боковых направляющих планок; - зазор между ножом и рабочей поверхностью круга. Если прокладки не параллельны основанию ножа, а угол наклона клина неверен, то опорная поверхность ножа может быть смещена относительно оси круга. Угол скоса ножа зависит от диаметра детали, припуска на обработку и режима шлифования. Материал опорной поверхности ножей влияет на их стойкость и качество шлифования. Высота установки ножа относительно линии центров кругов станка определяется в зависимости от диаметра обрабатываемой детали, угла скоса опорной поверхности ножа и высоты установки оси детали относительно центров кругов. Чтобы проверить правильность установки опорной поверхности ножа по высоте, используют штангенвысотомер, установленный на базовую плоскость крепления суппорта к каретке.

	При проверке положения ножа по высоте положение суппорта относительно круга должно оставаться неизменным. Чтобы деталь контактировала с кругами (шлифовальным и ведущим), необходимо переместить бабку ведущего круга. Для установки ножа по высоте нужно выполнить следующие действия: - определить расстояние от базовой плоскости суппорта ножа до линии центров станка h_1 с помощью руководства к станку или опытным путём; - установить обрабатываемую заготовку на нож и ведущий круг на выходе из зоны шлифования; - с помощью глубиномера выставить нож в вертикальной плоскости на нужную высоту; - повторить операцию со стороны входа детали в зону обработки; - проверить и скорректировать положение ножа после правки ведущего круга.
--	--

Высказанные критические замечания и обнаруженные несоответствия могут свидетельствовать о том, что существующая методология не позволяет создать полноценную модель, которая бы точно описывала взаимодействие обрабатываемой поверхности с кругами и опорной плоскостью. Без этой модели невозможно определить оптимальные режимы обработки и настроить оборудование для бесцентрового шлифования наружных цилиндрических поверхностей.

Дополнительным аргументом в пользу необходимости улучшения методических подходов является то, что некоторые теоретические результаты исследований в полной мере не были апробированы на практике и не нашли применение на действующих машиностроительных предприятиях.

В целях оценки реальной ситуации и анализа использования методического материала по способам наладки оборудования и назначения технологических режимов, на производственных комплексах, применяющих в процессе обработки деталей станки с бесцентровым шлифованием, было проведено количественное исследование. В качестве методики было выбрано проведение анкетирования на предприятиях Поволжского региона (Саратовская, Волгоградская и Пензенская области) на которых используется бесцентрово шлифовальное оборудование.

Разработана форма проведения анкетирования, включающая информацию об используемом оборудовании, размеры используемой технологической оснастки и настроечные параметры, особенности наладки, примеры параметров деталей. Проведены фокус-группы с работниками технологических служб предприятий и наладчиками станков с бесцентровым шлифованием. Проведено анкетирование сотрудников (рис. 1.9 - 1.13), (приложение 1). На рисунках представлены примеры анкет, охватывающих разнообразные по параметрам детали и использованному технологическому оборудованию.

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко»

Подразделение – цех 24

ФИО наладчика – *****

Контактные данные – *****

Оборудование

Модель - RC-18

производитель – MACHINE TOOLS CORP

заводской номер – TS-1101001|

год выпуска – 2011

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 150 мм

Ведущие круги – 150 мм

Ширина (высота) кругов - 200

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 3° (не меняется)

Особенности наладки:

Припуск – 0,002 – 0,01 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 40%

Правка шлифовального круга – 1 раз в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3-4 смены

Место перекреста кругов- не определяется

Наладка:

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода, шлифовального и ведущего кругов;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 3°;

- опорный нож регулируется по высоте (расстояние между опорой и вершиной ножа);

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа осуществляется по слуху для установления момента их контакта в процессе подвода шлифовального круга, с последующим отводом круга на величину примерно равную 0,01 мм.

Пример типовой детали:

Наименование – пруток (подготовка для операций, выполняемых на высокоточных автоматах продольного точения)

Материал – Ст10 ГОСТ 1050-2013

Диаметр – 5-25 мм

Длина – 30 мм

Шлифовальный круг - NORTON 07 455*205*228 6 39C80K6V

Ведущий круг – KINIK 7 A 255*205*111 20 A 150 ST R 7

Рисунок 1.9 – анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко»

Наименование предприятия – АО «НПП «Алмаз»
Подразделение – Участок изготовления оснастки и инструмента
ФИО наладчика – *****
Контактные данные - *****

Оборудование

Модель – 3А130
производитель – Станкостроительный завод им. С.М.Кирова
заводской номер – №69017
год выпуска – 1969

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - до 200 мм.
Ведущие круги – до 150 мм.
Ширина (высота) кругов до 40 мм.
Угол наклона опорного ножа – 30 °.
Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – до 2 °.

Особенности наладки:

- настройка ведется за чет подачи шлифовального и ведущих кругов;
- возможность поворота шлифовального круга до 3°;
- настроечным параметром является расстояние между центром обрабатываемой детали и вершиной опорного ножа;
- плоскость зоны обработки в которой центры шлифовального и ведущего кругов лежат в одной горизонтальной плоскости совпадает с передней торцевой плоскостью шлифовального круга;
- износ шлифовального круга (по диаметру) может достигать 50 процентов.

Пример типовой детали:

Наименование – Валик.
Материал – 12Х18Н9 ГОСТ 5632- 2014
Диаметр – 7 мм (предельные размеры – -13 мкм, -35 мкм).
Припуск общий – 0.5 мм, при окончательном шлифовании – 0.05 мм.
Длина – 46 мм.

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25А 40 К 6 V 50 1, 7 305 150 120 25А 50 К 6 V 50 1

Ведущий круг – вулканитовый (среднетвердый) ПП 150*40*65 14А F60 Р R

Рисунок 1.10 – анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования АО «НПП «Алмаз»

Наименование предприятия – АО «ЕПК Саратов»
Подразделение – Цех высокоточных подшипников (Цех №8)
Участок предварительной шлифовки
ФИО наладчика – *****
Контактные данные - *****

Оборудование

модель SASL 200*500 A
производитель – Германия (ГДР)
заводской номер – 002333092
год выпуска – 1982

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 500 мм
Ведущие круги – 315 мм
Ширина (высота) кругов
Угол наклона опорного ножа – 45°
Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 3°

Особенности наладки:

Угол наклона ведущего круга при переналадке не меняется
Шлифовальный круг не подвижен, привод ведущего круга
Допуск до 20 мкм
Максимальный припуск – 100 мкм за проход
Износ шлифовального круга (после правок) до 70%
Правка шлифовального круга – примерно через 2 часа работы
Правка ведущего круга – очень редко
Место перекреста кругов- середина рабочей зоны

Наладка – высота ножа по середине опорной поверхности, расстояние от этой точки до основания ножа.

- расстояние между осями шлифовального и ведущего кругов

Пример типовой детали:

Наименование – кольцо наружное п/ш 215
Материал – шх15СГ ГОСТ 801-2022
Диаметр – 215 мм

Рисунок 1.11 – анкета по результатам опроса станков бесцентрового шлифования
АО «ЕПК Саратов»

Наименование предприятия – ООО «СЭПО-ЗЭМ»

Подразделение – Инструментальный цех

ФИО наладчика – *****

Контактные данные – *****

Оборудование

модель - KOENIG&BAUER / HAHN&KOLB

производитель – WURZBURG / STUTTGART

заводской номер – A21/127

год выпуска – 1943

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 350 мм.

Ведущие круги – 350 мм.

Ширина (высота) кругов 125 мм.

Угол наклона опорного ножа – 30 °.

Особенности наладки:

- регулирование угла наклона ведущего круга конструкцией станка не предусмотрено;
- обеспечение движение заготовки вдоль оси обеспечивается за счет правки ведущего круга, на основе опыта наладчика;
- шлифовальный круг неподвижный, ведущий круг перемещается за счет поперечной подачи;
- имеется в наличии комплект опорных ножей, отличающихся высотой и шириной;
- при установке опорных ножей, зазор со шлифовальным кругом – 0.05 мм;
- наладка на основе опыта оператора по пробным проходам (припуск при предварительной обработке – 0.1 мм, окончательной – 0.05 мм);
- типовых настроечных параметров нет, решение принимает оператор;
- допустимый износ шлифовального круга (по диаметру) – до 40 процентов.

Пример типовой детали:

Наименование – Валик.

Материал – 9ХС ГОСТ 5950-2000

Диаметр – 14 мм (допуск – 0.02 мм)

Припуск при окончательном шлифовании – 0.1 -0.05 мм.

Длина – 100 мм.

Шлифовальный круг - 54С Р40N7V35А ГОСТ 2424-83

Ведущий круг – вулканистый (среднетвердый) 14А F60 Р R

Рисунок 1.12 – анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования ООО «СЭПО-ЗЭМ»

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «Титан- Баррикады»

Подразделение – Инструментальный цех

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

Модель - Stanexim BCA 184 NC22 с ЧПУ
производитель – MASHINE TOOLS AND TECHNOLOGY (Белорусь)
заводской номер – 0001
год выпуска – 2018
|

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 370 – 500 мм.
Ведущие круги – 295 – 350 мм.
Ширина (высота) кругов 260 мм.
Угол наклона опорного ножа – 30 °.
Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 0.8 ° (постоянный).

Особенности наладки:

- при наладке перемещаются шлифовальный и ведущий круги;
- регулировка опорного ножа выполняется посредством эксцентриситета;
- положение ножа не регулируется в горизонтальной плоскости относительно кругов, рассматривается расположение детали совместно относительно всех элементов технологической оснастки;
- настройка расположения центра заготовки и осей кругов выполняется с использованием специального приспособления по рекомендациям «Руководство по эксплуатации станка BCA 184 NC22»;
- наладка станка осуществляется в плоскости торца кругов;
- наладка станка занимает не менее 5 часов;
- припуск – до 0.5 мм.
- правка шлифовального круга при непрерывной работе 1-2 раза в смену;
- правка ведущего круга – значительно реже;
- износ шлифовального и ведущего кругов – до 60%.

Пример типовой детали:

Наименование – Вал.
Материал – 40Х ГОСТ 1050-2013 (после термообработки)
Диаметр – 8 мм
Припуск при окончательном шлифовании – 10 мкм
Длина – 30 мм.
Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1
Ведущий круг – вулканитовый (среднетвердый) 14A F60 P R

Рисунок 1.13 – анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»

По итогам обследования подразделений предприятий, использующих бесцентрово шлифовальное оборудование выполнена обработка полученной информации, результаты которой систематизированы по функциональной общности и оформлены в виде диаграмм, ряд из которых приводится на рисунке 1.14:

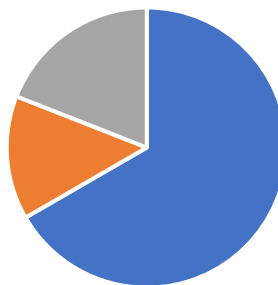


Подходы к настройке расположения опорной плоскости ножа



- Установление зазора между ножом и шлифовальным кругом, принимается минимальным (для обеспечения отвода стружки)
- Установление зазора между ножом и шлифовальным кругом имеющего постоянную величину
- Устанавливается зазор между ножом и шлифовальным кругом после контакта (появление искры и отвода ножа на постоянную величину)
- Нож имеет постоянное положение в горизонтальной плоскости

Варианты регулирования осей шлифовального и ведущего кругов в выбранной плоскости наладки



- Установление расположения оси ведущего круга при неизменном расположении оси шлифовального круга
- Последовательное итерационное регулирование шлифовального и ведущего кругов
- Совместное управление расположением осей кругов по имеющимся типовым настройкам и опыту наладчиков

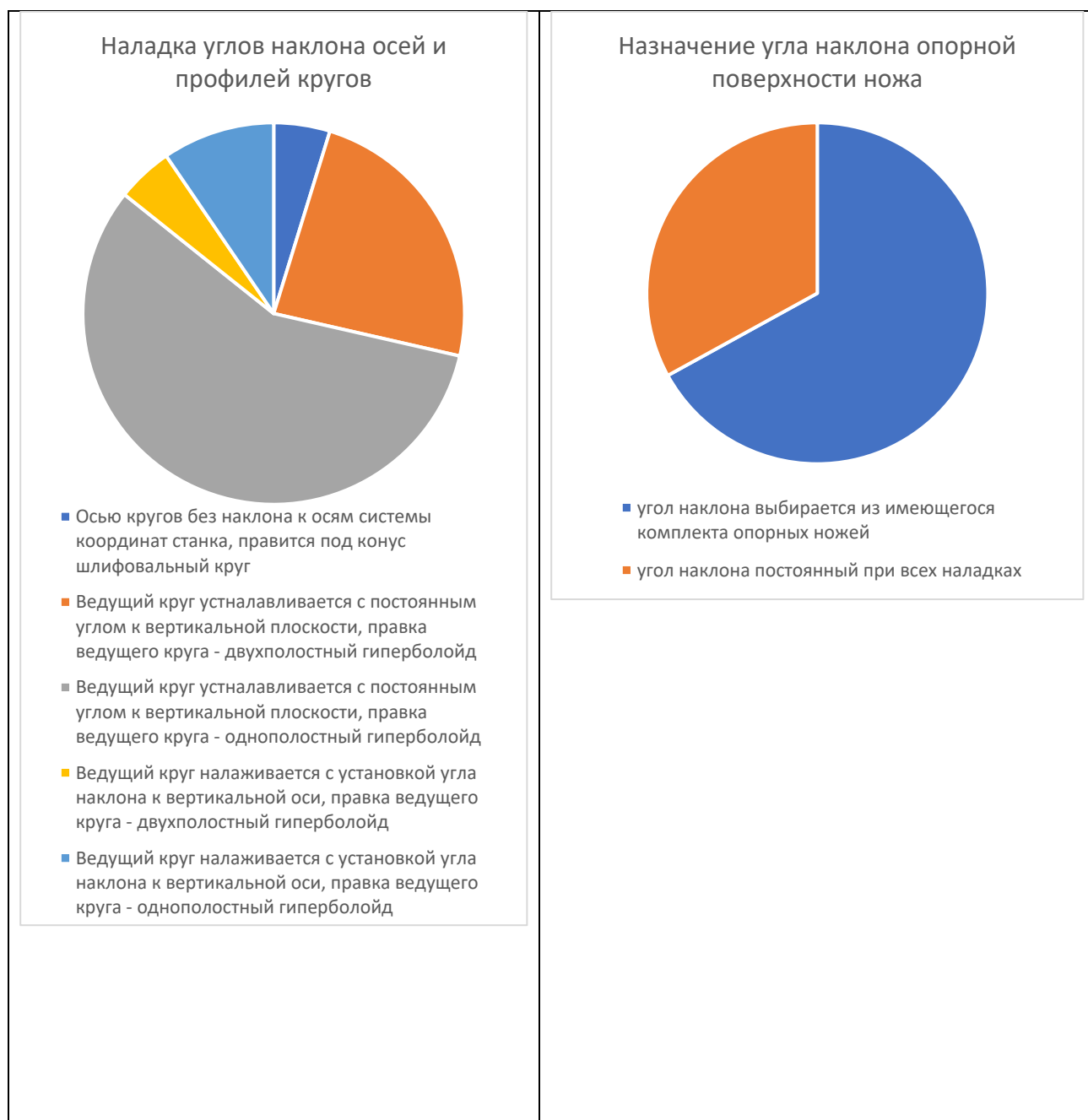


Рисунок 1.14 – Результат обработки анкет

Выводы по главе 1

Проведенный анализ известных литературных данных и исследования современного состояния технологической подготовки операций бесцентрового шлифования, на действующих производственных комплексах, показывает, что до настоящего времени отсутствует единый методический подход к технологическому обеспечению операций бесцентрового шлифования.

Проектирование и реализация технологических процессов, выполняемых на бесцентрово шлифовальных станках, должна предусматривать возможность принятия проектных решений с учетом реального состояния технологического оборудования и снижения доли субъективного фактора при наладке.

Обзор работ ученых и практиков, занимающихся исследованиями в области бесцентрово шлифовальной обработки, показал, что задача создания формализованных моделей, позволяющих устанавливать рациональные технологические режимы до настоящего времени, не была решена, что подтверждает задачу создания автоматизированных подсистем проектирования и реализации операций бесцентрового шлифования, обеспечивающих повышение экономической эффективности функционирования производств.

По результатам представленных выводов поставлена задача, разработать модели технологического обеспечения рациональной настройки оборудования для высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования.

Глава 2. Разработка моделей рациональной настройки технологических операций проходного бесцентрового шлифования

2.1 Классификация операций бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим признакам

Анализ научных и технических источников, а также практического опыта позволил сделать вывод о том, что существующие подходы к бесцентровому шлифованию не являются комплексными и охватывают только отдельные аспекты. Это указывает на отсутствие системного подхода к технологической подготовке производства [43]. Хотя схемы обработки при бесцентровом шлифовании в целом схожи, существует множество специфических условий, которые необходимо учитывать при их реализации. С одной стороны, это усложняет разработку единой модели проектных процедур для технологических операций. С другой стороны, это позволяет объединять и создавать группы обработок, которые имеют общие методы принятия проектных решений [87].

Для решения этой задачи проведены исследования, основанные на собранной научно-технической информации о возможностях, особенностях и практическом опыте бесцентрового шлифования, разработан подход и проведена научно обоснованная классификация этих операций по конструкторско-технологическим признакам (рисунок 2.1) [87].



Рисунок 2.1 – Методы обработки бесцентровым шлифованием

В целях формирования объединения групп характеристик, отражающих технологические особенности возможных методов бесцентрового шлифования, проведено их распределение по условно независимым областям. Подробно описаны и представлены данные в виде баз данных, что позволяет провести дальнейшую формализацию проектных процедур технологической подготовки операций, выполняемых на бесцентрово шлифовальном оборудовании [87].

Сформированные критерии позволили в полной мере описать диапазоны возможностей и технологические параметры процесса обработки (приложения 2-5) по следующим аспектам [46,12,87]:

1. Конструкторские характеристики объектов обработки с использованием методов бесцентрового шлифования, включая тип обрабатываемой поверхности, конструктивные особенности детали, размерные параметры обрабатываемой поверхности, обрабатываемость материала детали и другие параметры.
2. Конструктивная схема технологического оборудования, включая структурную схему обработки, используемые приводы и другие компоненты.
3. Информация о шлифовальном круге, включая количество кругов, типы движения, направление движения, расположение оси круга относительно координат оборудования, форму профиля круга и другие характеристики.
4. Информация о ведущем круге, включая количество кругов, типы движения, направление кругового движения, расположение оси круга относительно координат оборудования, форму профиля круга и другие характеристики.
5. Схема базирования заготовки, включая типы базовых поверхностей, взаимное расположение обрабатываемых и базовых поверхностей и другие параметры.
6. Характеристики установочных элементов, включая конструкцию элементов, относительное движение детали к установочным элементам,

расположение оси направляющего элемента относительно координат станка и другие характеристики.

Полученные результаты позволили создать структуру исходной базы данных и определить критерии для всех возможных вариантов схем бесцентрово-шлифовальной обработки как для существующего, так и для перспективного оборудования [95]. При заполнении базы данных использовалась реляционная форма, которая позволила избежать неоднозначности в определении элементов базы и была ориентирована на использование кластерного анализа в качестве математического инструмента для дальнейших исследований [44]. Для решения задач, связанных с рассматриваемыми методами обработки, использовался аппарат кластерного анализа. Объективная кластеризация основывалась на переборе множества потенциальных кластеров с целью выбора оптимального состава групп по однородности выполнения проектных процедур технологической подготовки производства [87].

Для выполнения кластерного анализа как метода автоматической классификации использовалась таблица расстояний или различий, которая была создана на основе исходной базы данных, содержащей информацию в логическом формате. Кластеризация схем бесцентрово-шлифовальной обработки проводилась как для всей базы данных, так и для отдельных её элементов в соответствии с их характеристиками [87]. Окончательное решение о том, как лучше объединить схемы обработки в группы, зависит от того, на каком уровне иерархии они находятся [96].

Разработан метод (приложение 15) [79], позволяющий последовательно выполнять вычисления и определить, насколько однородны сформированные группы по конструкторско-технологическим характеристикам (рис.2.2, приложение 6) и характеристикам, влияющим на силовую схему реализации процесса бесцентрового шлифования (приложения 7-9) [87].

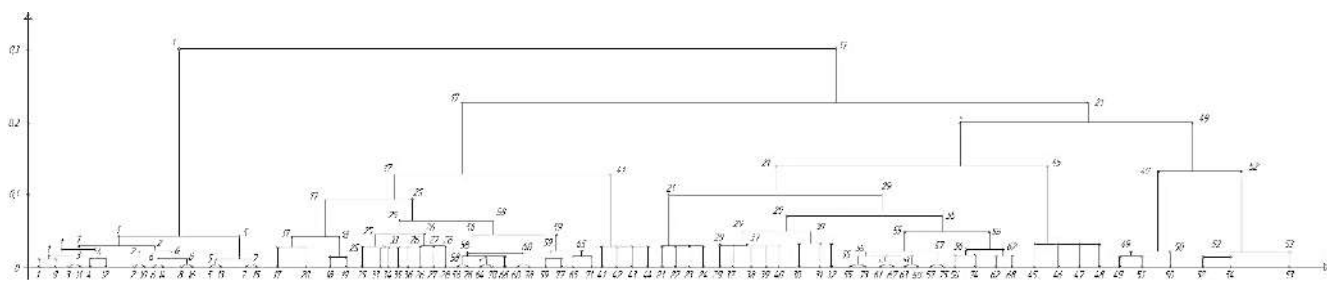


Рисунок 2.2 – Дендрограмма формирования методов бесцентрово шлифовальной обработки по конструкторско-технологическим характеристикам

Рассмотрены все кластеры, которые представляют собой сформированные множества методов бесцентровой обработки $M = \{m_1, \dots, m_{70}\}$ по конструкторско-технологическим характеристикам (матрица G_k), сформированные на j -ом уровне показателя иерархии $G_j(k)$, где:

k — количество кластеров, сформированных на j -ом уровне показателя иерархии.

Далее проведено анализ $G_j(k)$ кластеров $R_{1j1}(n_1)$, $R_{2j2}(n_2)$, $R_{3j3}(n_3)$, которые были сформированы на основе дендрограмм при анализе матриц методов обработки по характеристикам, влияющим на схему реализации процесса бесцентрового шлифования.

$j_1(n_1)$ — значение показателя иерархии, на котором сгруппирован n_1 кластер $R_{1j1}(n_1)$, при $1 \leq n_1 \leq n_1(\max)$, где $n_1(\max)$ — максимальное количество кластеров, сформированное на уровне с показателем иерархии j_1 .

$j_1 \leq j$, $j - j_1 = \min(j_1)$, уровень иерархии j_1 должен быть не больше j и быть ближайшим к нему. Аналогично для $j_2(n_2)$, $j_3(n_3)$.

$R_{1j1}(n_1)$ — кластеры, которые включают множество методов обработки по характеристикам матрицы R_1 на уровне иерархии j_1 . Аналогично для $R_{2j1}(n_1)$, $R_{3j1}(n_1)$.

На основе анализа определены кластеры $R_{1j1}(n_1)$, $R_{2j2}(n_2)$, $R_{3j3}(n_3)$ с максимальным объединением множеств. Если кластеры имеют одинаковое количество объединений, выбирается кластер с большим числом множеств в объединении. Если оба этих значения совпадают, определяется удельный вес

объединений к общему множеству $G_j(k)$ [87]. Выполненные формализованные действия позволяют определить множество методов бесцентровой обработки в каждом из выбранных кластеров на определённом уровне иерархии.

$R1j1(n1) \max = \{m_i, \dots\}$, $R2j2(n2) \max = \{m_i, \dots\}$, $R3j3(n3) \max = \{m_i, \dots\}$ [87].

Количество кластеров G_k , сформированных на определённом уровне иерархии, участвующих в объединении с $R1j1(n1) \max$, $R2j2(n2) \max$, $R3j3(n3) \max$.

Удельный вес количества всех возможных методов обработки $M = \{m_1, \dots, m_{70}\}$ к количеству методов, объединённых в множества $R1j1(n1) \max$, $R2j2(n2) \max$, $R3j3(n3) \max$ [87].

Разработанные математические модели позволили классифицировать методы бесцентрового шлифования по их конструктивно-технологическим параметрам и провести детальный анализ результатов кластеризации. Это позволяет принять научно обоснованное решение о формировании групп на основе критериев однородности при выполнении проектных процедур, связанных с назначением параметров технологических операций. Данный метод обоснования и определения уровня иерархии является универсальным и может быть использован для решения различных задач. Для его применения необходимо правильно сформировать структуру исходных данных, которые отражают цель и задачи проектной процедуры, для которой проводятся исследования [52,87].

По итогам проведенного обследования реального состояния производственной системы действующих машиностроительных предприятий Поволжского региона, было выявлено, что наиболее широкое применение из числа методов бесцентрового шлифования уделяется методу продольной подачи (сквозное шлифование). На основании полученных результатов принято решение о необходимости более детального изучения данного метода обработки. В связи с этим, в ходе исследования было проведено изучение использования этой методологии в процессе продольного бесцентрового шлифования.

В процессе оптимизации бесцентрово-шлифовального оборудования для операций продольного шлифования проанализированы различные аспекты: типы

компоновок, траектории движения шлифовальной головки, расположение опор шпинделей, а также расположение центров (вертикальное, горизонтальное, наклонное) и другие конструктивные характеристики. Дополнительно учтены особенности обрабатываемых объектов: тип поверхности, размеры и характеристики материала. Рассмотрены характеристики используемых шлифовальных и ведущих кругов: форма и количество кругов, направление вращения, расположение оси кругов в системе координат станка. Изучены особенности применения установочных элементов: форма поверхностей и ориентация [87].

Полученные данные стали основой для проведения классификации методов продольного бесцентрового шлифования с использованием аппарата кластерного анализа. Получены результаты автоматической классификации в виде дендрограмм для сформированной базы данных и её компонентов (рис 2.3).

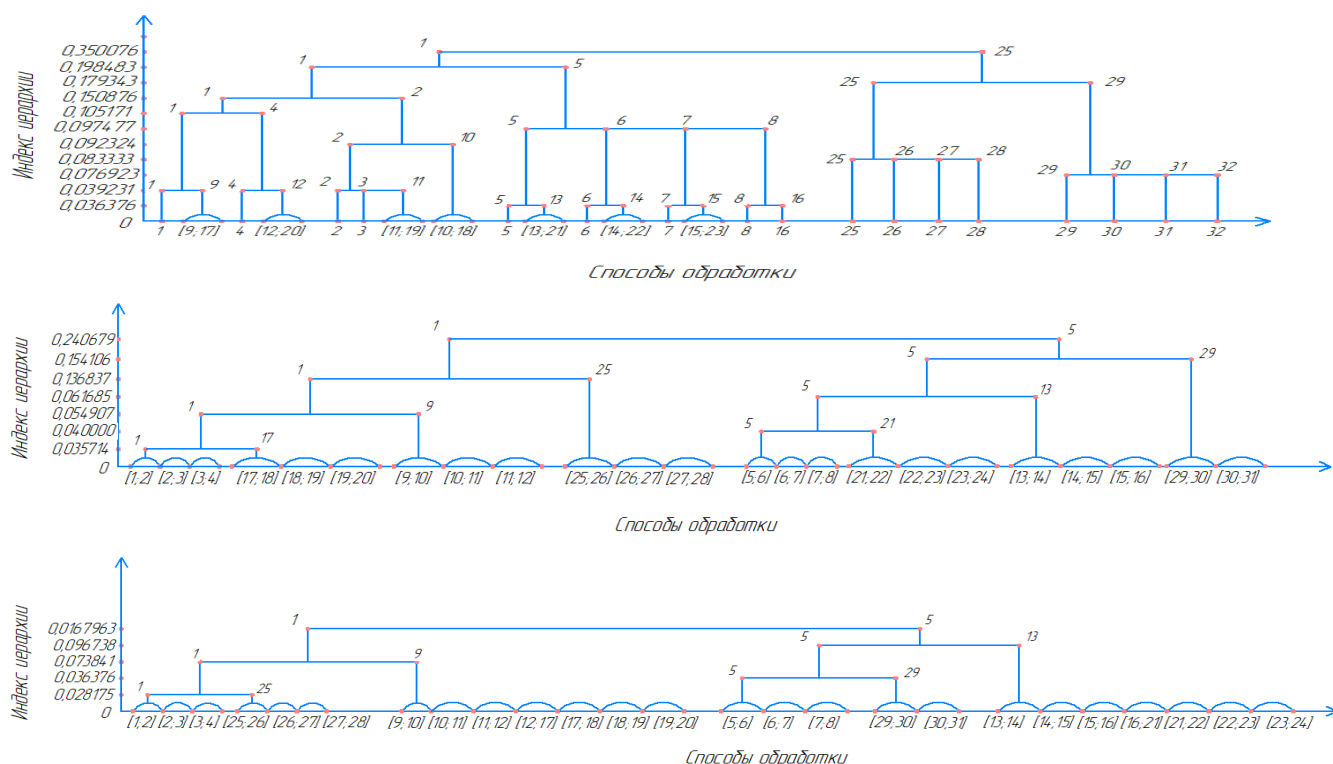


Рисунок 2.3 – Результаты классификации методов проходного бесцентрового шлифования

Результатом применения разработанной модели является обоснование уровня иерархии и, следовательно, состава групп методов бесцентрового шлифования на основе результатов проведённого кластерного анализа. Это позволяет унифицировать подходы к решению задач при проектировании технологических процессов бесцентрово-шлифовальной обработки с учётом особенностей взаимодействия заготовки и элементов станочной системы [87].

В процессе разработки проекта, направленного на определение рациональных параметров обработки с учётом фактического состояния оборудования, были созданы дополнительные информационные ресурсы. В них содержатся сведения о характере контакта обрабатываемых поверхностей с элементами технологической системы, а также о направлениях и влиянии сил, действующих в местах контакта (рис 2.4) [87].

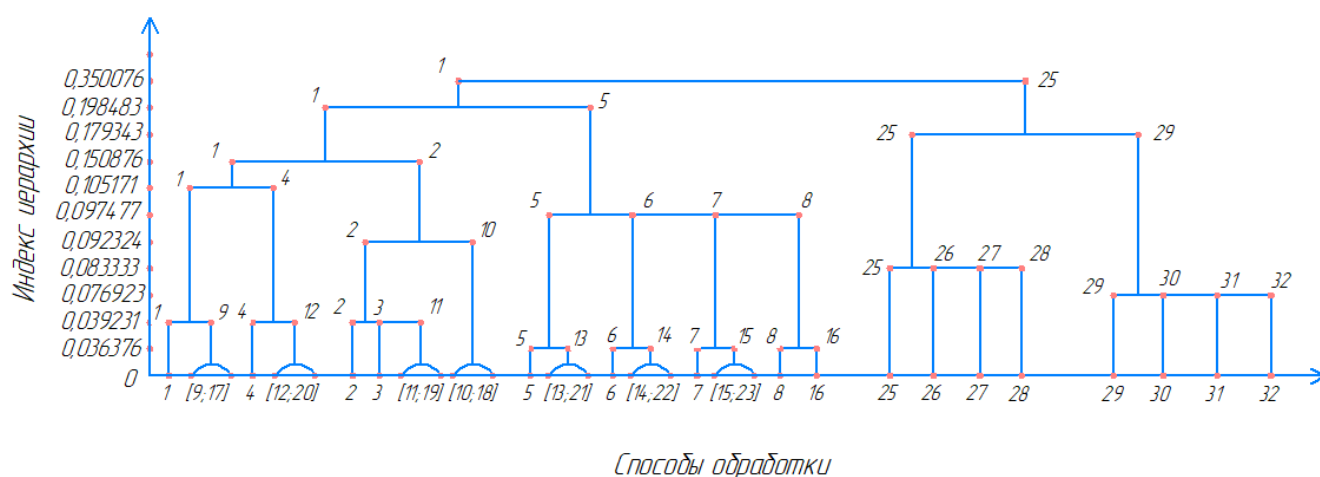


Рисунок 2.4 – Классификация методов проходного бесцентрового шлифования с учетом характера контакта обрабатываемых поверхностей с элементами технологической системы

Алгоритм, позволяющий определить результаты кластерного анализа, был реализован на основе расчётного стандартного индекса иерархии на каждом уровне дендрограмм, с обоснованием вывода об однородности сформированных групп [87].

Значимость результатов исследования заключается в возможности варьирования состава групп методов продольного бесцентрового шлифования в

зависимости от этапов технологической подготовки производства, связанных с определением технологических параметров, обеспечивающих требуемые качественные характеристики обрабатываемой поверхности [87].

В результате кластерного анализа было сформировано несколько вариантов объединения групп, однородных по проектным процедурам. В первом варианте значение уровня иерархии было определено как 0,135527 (приложение 10), включающее три сформированные группы методов продольного бесцентрового шлифования. Во втором случае значение уровня иерархии было определено как 0,094772 (приложение 11), включающее пять сформированных групп продольного бесцентрового шлифования [87].

В результате анализа двух вариантов объединения групп, которые однородны по проектным процедурам, очевидно, что второй вариант наиболее точно отражает особенности процесса. Такой подход является отличительным от известных направлений исследований в этой области и позволяет объективно сгруппировать различные методы обработки на основании однородности выполнения проектных процедур при разработки технологических процессов. Научно обоснованное и формализованное определение пяти методов обработки заготовок при продольном бесцентровом шлифовании позволяет более точно решить поставленную задачу и объективно сформировать группы схем обработки с учётом конкретных условий производства [87].

В результате анализа практических данных и ранее проведённой классификации методов продольного бесцентрового шлифования на основе конструкторско-технологических характеристик было установлено, что наиболее часто на практике применяются методы, объединённые в группу УЗ. Эта группа включает в себя методы обработки наружных цилиндрических поверхностей с использованием проходного бесцентрового шлифования [50].

Особенностью этих методов является перемещение заготовки в рабочей зоне за счёт взаимодействия заготовки с элементами технологической системы. Для этого используются неподвижные направляющие, имеющие плоскую форму, и

точечные контакты обрабатываемой поверхности с шлифовальным, ведущим кругом и опорной поверхностью в каждом сечении рабочей зоны [50].

Проведённые исследования позволили выявить характерные конструкторско-компоновочные схемы оборудования и технологические условия реализации бесцентрового шлифования наружных цилиндрических поверхностей для этой группы методов, для которой проводились дальнейшие исследования в работе. Основные конструкторско-компоновочные схемы и технологические условия реализации выделенной группы методов обработки: использование одного шлифовального и одного ведущего круга, опорная поверхность в форме наклонной плоской поверхности; положение оси шлифовального круга при наладке и подналадке не изменяется; возможность наклона оси ведущего круга в вертикальной плоскости; вращение шлифовального и ведущего круга по часовой стрелке; форма опорного ножа имеет гладкую поверхность, наклонена в сторону ведущего круга; расположение плоскости опорного ножа не меняется относительно оси шлифовального круга; правка шлифовального круга выполняется по прямолинейной траектории; форма ведущего круга для обеспечения проходного бесцентрового шлифования имеет форму одно- или двуполостного гиперболоида [50].

2.2. Назначение параметров при наладке операций проходного бесцентрового шлифования

Для развития научно-методической базы технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования, основываясь на результатах, полученных ранее, была предложена последовательность наладки оборудования, направленная на уменьшение влияния субъективных факторов на этапе наладки, учета реальных производственных условий и обеспечивающая сокращение наладки при обеспечении стабильности качества выполнения операций проходного бесцентрового шлифования [50].

Анализ современного состояния научно-технических исследований, представленный в 1 главе, и классификация бесцентрово-шлифовальной обработки по конструкторско-технологическим характеристикам позволили выявить проблемные области, препятствующие её развитию. Одной из основных проблем является развитие методического обеспечения наладки станков. В главе представлены предложения по расчёту параметров наладки обработки наружных цилиндрических поверхностей методом проходного бесцентрового шлифования на основе созданных математических моделей определения взаимосвязей между обрабатываемыми поверхностями и элементами технологической системы [63].

Главный нормативный параметр традиционного обеспечения требуемой точности размеров и геометрической формы обрабатываемых деталей — использование в качестве основного параметра настройки станка высоты установки центра заготовки относительно линии центров кругов. Несмотря на то, что этот параметр настройки рекомендован в научно-технической литературе и документации [3,22,58,66,85,99], возникают практические проблемы с его определением, поскольку точка пересечения осей не является материальной, а положение центра заготовки зависит от множества факторов. Очевидно, что этот фактор существенно влияет на то, что окончательная настройка кругло-шлифовальных операций осуществляется только опытным путём и её качество в значительной степени зависит от квалификации технического персонала. На то, насколько правильно и равномерно заготовка движется во время обработки поверхности в рамках технологического процесса, влияют не только точность, геометрия и характеристики шлифовального, ведущего кругов и опорного ножа [63], также важно, как расположены все элементы технологической системы относительно обрабатываемой поверхности. В операциях бесцентрового шлифования в процессе обработки деталь постоянно меняет своё положение в рабочей зоне станка [53]. Это связано с тем, что диаметр детали и профиль ведущего круга постоянно меняются. Поэтому при разработке модели для

настройки параметров важно определить места контакта заготовки с элементами технологической системы.

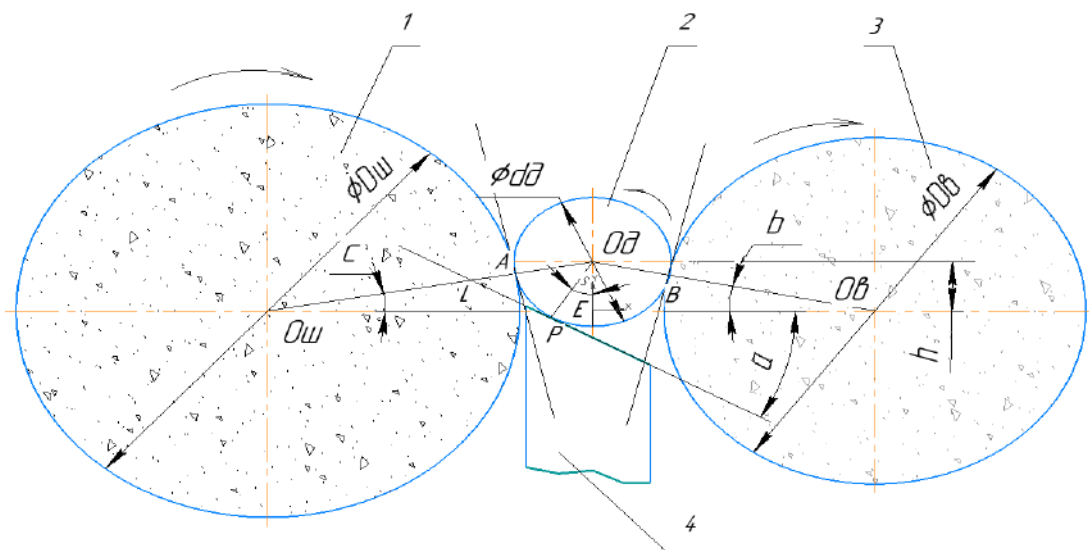
В ряде известных методик расчёта наладочных размеров при рассматриваемом методе обработки в качестве схемы базирования используется «базирование в призме», образованная опорным ножом и ведущим кругом. При этом контакт со шлифовальным кругом не учитывается. Хотя даже в этих работах существуют противоречия такому подходу, когда рассматриваются вопросы силового контакта детали, последовательности наладки станка, жёсткости технологической системы, возникновения зазора между деталью и ведущим кругом, необходимости определённого натяга между деталью и шлифовальным кругом [63].

Ещё одно требование, которое не учитывается в известных методиках — необходимость постоянного определения мест контакта обрабатываемой поверхности с опорным ножом и кругами во время реализации технологической операции. Необходимо учитывать как положение и изменяющиеся размеры обрабатываемой поверхности детали в зоне обработки, так и действительные размеры кругов [63].

В настоящее время некоторые положения теории базирования, в части выполнения бесцентрово-шлифовальных операций, корректируются, в том числе те, которые отражают принципы определения реальной схемы базирования. Которые формируются с точки зрения создания силового замыкания между базирующей деталью и сопряжёнными с ней элементами. Данный подход предлагается как пример неопределённости базирования, характеризующийся изменением положения детали относительно сопрягаемых элементов в процессе обработки [4,6, 63].

На рисунке 2.5 представлена традиционно используемая в научной литературе схема проходного бесцентрового шлифования, дополненная необходимыми для установления позиционных взаимосвязей между размерными параметрами, которые позволили вывести следующие зависимости: расстояние

между центрами шлифовального круга и обрабатываемой поверхностью детали; расстояние между центром обрабатываемой поверхности и пересечением с линией проходящей через центры кругов; расстояние между центрами ведущего круга и обрабатываемой поверхностью детали [63].



1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – ведущий круг,
4 – опорный нож

Рисунок 2.5 – Схема проходного бесцентрового шлифования

Величины углов $\angle \gamma$ и $\angle \beta$ взаимосвязаны и определяются размерными параметрами обрабатываемой поверхности детали, шлифовального $D_{ш}$ и ведущего $D_{в}$ круга и наладочными размерами расстояния между центрами кругов $|O_{ш} O_{д}|$, h – высотой установки центров заготовки относительно линии центров кругов. $|O_{д} P|$ является радиусом обрабатываемой поверхности детали и в точке P образует перпендикуляр к образующей плоскости ножа, касательной к диаметру обрабатываемой поверхности [63].

$$c^{\circ} = \sin^{-1} \frac{2h}{D_{ш}+d} ; \quad (22)$$

$$e^{\circ} = \sin^{-1} \frac{\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c}{\frac{D_{ш}+d}{2}} ; \quad (23)$$

$$b^{\circ} = \sin^{-1} \frac{2h}{D_{в}+d} ; \quad (24)$$

$$|O_{ш} O_{в}| = |O_{ш} O_{д}| \cdot \cos c + |O_{в} O_{д}| \cdot \cos b = \frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b ; \quad (25)$$

$$\angle e = \angle O_{ш} P O_{д} ; \quad (26)$$

$$\frac{|O_{д} P|}{\sin c} = \frac{|O_{ш} O_{д}|}{\sin e} ; \quad \sin e = \frac{|O_{ш} O_{д}| \cdot \sin c}{|O_{д} P|} ; \quad \sin e = \frac{((D_{ш}+D_{д})/2) \cdot \sin c}{(D_{д}/2)} ; \quad (27)$$

$$\angle f = \angle O_{ш} O_{д} P, \quad \angle f = 180^{\circ} - \angle e - \angle c . \quad (28)$$

Значение величины угла $\angle e$ и, следовательно, угла $\angle f$ зависят от расположения точки контакта касательной к окружности обрабатываемой поверхности детали в виде образующей плоскости опорного ножа и определяются размерными параметрами обрабатываемой поверхности детали, шлифовального $D_{ш}$ и ведущего $D_{в}$ кругов, $\angle a$ - углом наклона опорной поверхности ножа и наладочными размерами расстояния между центрами кругов $|O_{ш} O_{в}|$, h – высотой установки центров заготовки относительно линии центров кругов [63].

Выполненное обобщение представленной информации позволило сформулировать следующие основные заключения, обосновывающие необходимость кардинального изменения организации технологической подготовки операций бесцентрового шлифования. При наладке в значительной мере не используются известные теоретические методики и рекомендации. Качество наладки бесцентрового оборудования в основном зависит от опыта и квалификации наладчиков. Во всех случаях основным способом настройки является подгонка методом шлифования пробных деталей. Предварительная настройка станка выполняется разнообразными способами, связанными с большими погрешностями и временными затратами труда наладчиков.

Для нивелирования перечисленных недостатков и значительного снижения трудоемкости выполнения процесса наладки и подналадки проведены исследования, позволяющие развить известные теоретические методы. На их основе разработаны модели определения наладочных параметров с учетом

реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок. В качестве устанавливаемых наладочных выбраны параметры, регулирование которыми возможно с использованием рабочих органов оборудования, что повышает объективность качества выполнения работ и сокращает трудоемкость процедуры наладки оборудования [62].

Полученные зависимости устанавливают взаимосвязи между размерными характеристиками обрабатываемой поверхности и элементами технологического оборудования и оснастки, влияющих на места их контакта и обеспечения условия силового замыкания в процессе реализации обработки [47]. Для наладочного параметра – расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов в сечении, в котором выполняется наладка (оси кругов расположены в одной горизонтальной плоскости) представлены зависимости, устанавливающие взаимосвязь размерных характеристик [62].

Расстояние между центрами кругов $L_{D_{ш}D_{в}} = |D_{ш}D_{в}|$ зависит от изменения размерных характеристик:

- диаметра шлифовального круга $D_{ш}$;
- диаметра ведущего круга $D_{в}$;
- действительного размера диаметра заготовки обрабатываемой поверхности d .

Т.е. $L_{D_{ш}D_{в}}$ является функцией трех переменных $L_{D_{ш}D_{в}} = \mathcal{F}(d, D_{ш}, D_{в})$.

В этом случае для функции могут быть составлены уравнения в частных производных (на примере $\frac{\partial L_{D_{ш}D_{в}}}{\partial d}$):

$$\frac{\partial L_{D_{ш}D_{в}}}{\partial d} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{ш}+d}} + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{в}+d}} \right) - \frac{h}{(D_{ш}+d)\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{ш}+d}}} - \frac{h}{(D_{в}+d)\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{в}+d}}} , \quad (29)$$

решениями которых являются выражения:

- при переменной d

$$\begin{aligned}
L_{D_{\text{III}}D_{\text{B}}} = & \left((d + D_{\text{III}}) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}}} \right| - (d + \right. \\
& D_{\text{B}}) \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}} + \left. - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}} \right| \right) - h \ln |D_{\text{B}} + d - h + \\
& \sqrt{(D_{\text{B}} + d)^2 - 2h(D_{\text{B}} + d)}| - h \ln |D_{\text{III}} + d - h + \\
& \sqrt{(D_{\text{III}} + d)^2 - 2h(D_{\text{III}} + d)}| + C(D_{\text{III}}; D_{\text{B}}) ;
\end{aligned} \tag{30}$$

- при переменной D_{III}

$$\begin{aligned}
L_{D_{\text{III}}D_{\text{B}}} = & \frac{D_{\text{III}}}{2} \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}} + \frac{1}{2} \left((D_{\text{III}} + d) \sqrt{1 + \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}}} \right| \right) + \\
& h \ln |D_{\text{III}} + d - h + \sqrt{(D_{\text{III}} + d)^2 - 2h(D_{\text{III}} + d)}| + \frac{D_{\text{III}}h}{(D_{\text{B}}+d)\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}} + \check{C}(d; D_{\text{B}}) ;
\end{aligned} \tag{31}$$

- при переменной D_{B}

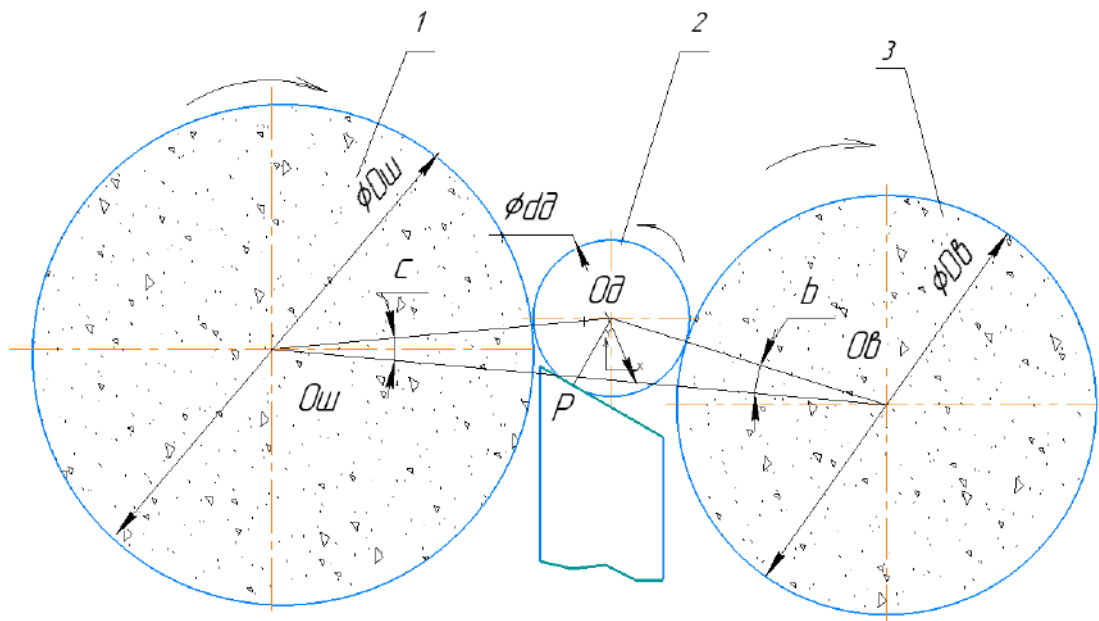
$$\begin{aligned}
L_{D_{\text{III}}D_{\text{B}}} = & \frac{D_{\text{B}}}{2} \sqrt{1 + \frac{2h}{D_{\text{III}}+d}} + \\
& \frac{1}{2} \left((D_{\text{B}} + d) \sqrt{1 + \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}} - h \ln \left| \frac{1 + \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}}{1 - \sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}} \right| \right) + \\
& h \ln |D_{\text{B}} + d - h + \sqrt{(D_{\text{B}} + d)^2 - 2h(D_{\text{B}} + d)}| + \\
& \frac{D_{\text{B}}h}{(D_{\text{B}}+d)\sqrt{1 - \frac{2h}{D_{\text{B}}+d}}} + \check{C}(d; D_{\text{III}})
\end{aligned} \tag{32}$$

где: h – рекомендованная высота установки центра заготовки обрабатываемой поверхности [62].

Полученные зависимости позволяют создать различные варианты систем уравнений, решение которых обеспечит выполнение заданных требований к настройке бесцентрово-шлифовального оборудования. Эти решения учитывают параметры, которые удобно использовать с учётом конструктивных особенностей конкретного оборудования и которые можно объективно контролировать в процессе настройки. Для большинства типов бесцентрово-шлифовального оборудования наиболее подходящим является использование в качестве настроечного размера расстояния между кругами. Это расстояние можно регулировать с помощью имеющихся органов управления станком, а его значение можно вычислить на основе существующих рекомендаций по высоте между центром заготовки и пересечением линии, проходящей через центры кругов [62].

2.3 Модель определения точек контакта заготовки с элементами технологической оснастки

Данные зависимости разработаны для случаев, когда центры шлифовального и ведущего кругов в поперечном сечении расположены на одной горизонтальной прямой. Однако при проходном бесцентровом шлифовании ведущий круг имеет наклон в вертикальной плоскости, и поэтому в некоторых поперечных сечениях центры кругов не находятся на одной горизонтальной прямой (рисунок 2.6) [63]. Для таких случаев были разработаны зависимости, учитывающие этот фактор. В качестве исходных данных используются диаметры шлифовального и ведущего кругов, расстояние между кругами, угол наклона плоскости ножа и угол наклона оси ведущего круга в вертикальной плоскости [63].



1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – ведущий круг
 Рисунок 2.6 – Схема проходного бесцентрового шлифования (сечения, в которых центры осей кругов расположены не на горизонтальной прямой)

Выведенные зависимости в разделе 2.2 позволили перейти к следующим стадиям формализации проектных действий этапов технологической подготовки, в части проведения работ по установлению координатных взаимосвязей между размерными характеристиками обрабатываемой поверхности и элементами технологической системы оборудования в пространстве всей рабочей зоны станка. Первоочередной задачей здесь являлось определение для сечений рабочей зоны станка расположение мест контакта поверхности заготовки со шлифовальным, ведущим кругами и опорной поверхностью ножа (рис. 2.7, 2.8) [53,62].

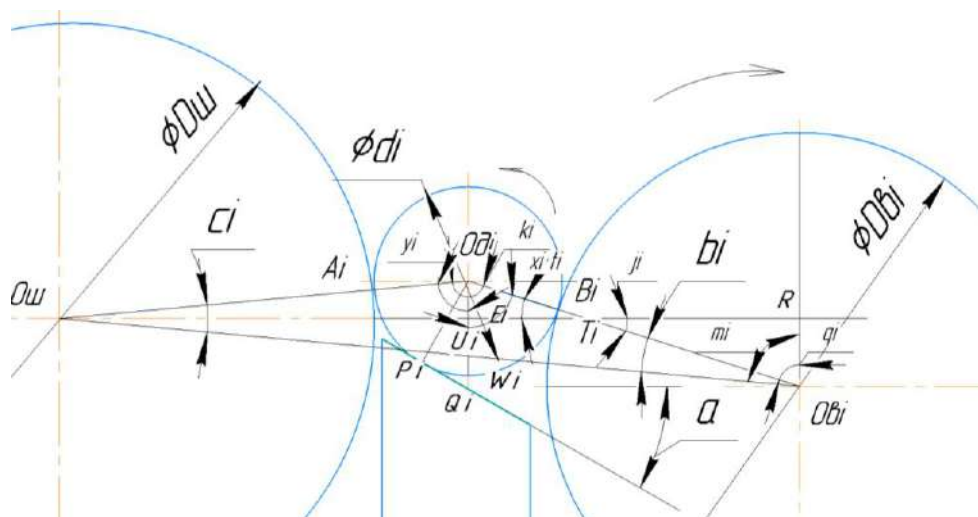


Рис. 2.7 Схема наружного проходного бесцентрового шлифования в сечении с негоризонтальным расположением линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов

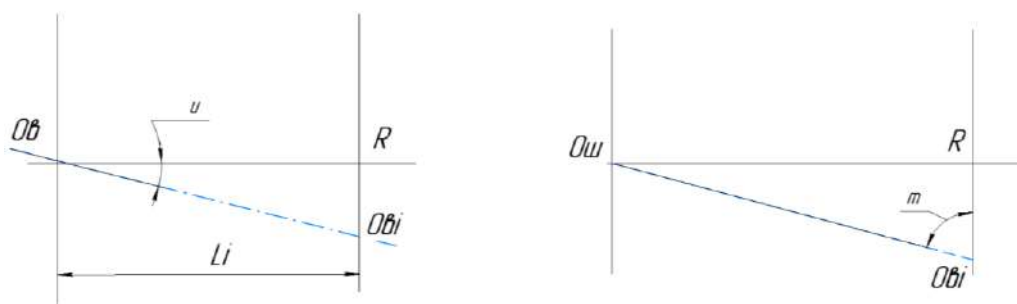


Рис. 2.8 Схемы для расчета смещения центра ведущего круга в рассматриваемом сечении рабочей зоны

В качестве исходных данных, кроме установленных наладочных параметров, при определении расположения точек контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы в i -ом сечении зоны обработки используются: L_i – расстояние между рассматриваемым сечением и сечением с горизонтальным расположением линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов, мм; u – угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, градусы; $D_{бi}$ – диаметр ведущего круга в рассматриваемом сечении, мм; d_i –

диаметр обрабатываемой поверхности в рассматриваемом сечении, мм. Расположение $Oш$ и диаметр $Dш$ в рабочей зоне не изменяются [53].

Созданы модели, позволяющие установить размерные и угловые значения возникающих связей определяющих пространственное расположение точек контакта. Представлены зависимости: для расчета расстояния между центрами шлифовального круга и обрабатываемой поверхности; угла между линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов, и линией, соединяющей центры ведущего круга и заготовки [53].

$$|O_{Bi} O_{Di}| = \frac{D_{Bi} + d_i}{2}. \quad (33)$$

$$|O_{ш} R| = \frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_B + d}{2} \cdot \cos b; \quad (34)$$

$$|R O_{Bi}| = \frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u; \quad (35)$$

$$|O_{ш} O_{Bi}|^2 = |O_{ш} R|^2 + |R O_{Bi}|^2 = \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_B + d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 \quad (36)$$

$$|O_{ш} O_{Bi}| = \sqrt{\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_B + d}{2} \cdot \cos b\right)^2 - \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2}. \quad (37)$$

$$\angle O_{ш} O_{Di} O_{Bi} = k_i^\circ; \quad (38)$$

$$\frac{|O_{ш} O_{Di}|}{\sin b_i} = \frac{|O_{Di} O_{Bi}|}{\sin c_i} = \frac{|O_{ш} O_{Bi}|}{\sin k_i}; \quad (39)$$

$$|O_{ш} O_{Di}|^2 = |O_{ш} O_{Bi}|^2 + |O_{Bi} O_{Di}|^2 - 2 \cdot$$

$$(|O_{ш} O_{Bi}| \cdot |O_{Bi} O_{Di}|) \cdot \cos b_i;$$

$$|O_{ш} O_{Di}|^2 = \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_B + d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 + \left(\frac{D_{Bi} + d_i}{2}\right)^2 - 2\left(\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_B + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{Bi} + d_i}{2}\right) \cdot \cos b_i \quad (40)$$

$$\begin{aligned} & |O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}| = \\ & \sqrt{\left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \cos bi} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} & \cos bi = \\ & \frac{|O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}|^2}{\left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)} \end{aligned} \quad (42)$$

$$|O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2 = |O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}|^2 + |O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|^2 - 2 \cdot \quad (43)$$

$$\left(|O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}| \cdot |O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|\right) \cdot \cos ki ;$$

$$|O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2 = \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2} \cdot \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \cos ki ; \quad (44)$$

$$|O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}| = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2} \cdot \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \cos ki} ; \quad (45)$$

$$\cos ki = \frac{|O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2}{\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2} \cdot \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)} . \quad (46)$$

$$|O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|^2 = |O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}|^2 + |O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2 - 2 \cdot \quad (47)$$

$$\left(|O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}| \cdot |O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|\right) \cdot \cos ci ;$$

$$\cos ki = \frac{|O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2}{\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2} \cdot \frac{D_{\text{Бi}}+\text{di}}{2}\right)} . \quad (48)$$

$$|O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|^2 = |O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}|^2 + |O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|^2 - 2 \cdot \quad (49)$$

$$\left(|O_{\text{ш}} O_{\text{дi}}| \cdot |O_{\text{ш}} O_{\text{Бi}}|\right) \cdot \cos ci ;$$

$$\begin{aligned} & |O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|^2 = \left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \\ & \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 - 2 \cdot \end{aligned} \quad (50)$$

$$\left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)\right) \cdot \cos ci$$

$$\begin{aligned} & |O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}| = \\ & \sqrt{\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 - 2 \cdot \left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)\right) \cdot \cos ci} \end{aligned} \quad (51)$$

$$\cos ci = \frac{|O_{\text{Бi}} O_{\text{дi}}|^2}{\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 - 2 \cdot \left(\left(\frac{D_{\text{ш}}+\text{di}}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_{\text{ш}}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{\text{Б}}+d}{2} \cdot \cos b\right)\right)} . \quad (52)$$

$$\angle O_{\text{Бi}} R Ti = 90^\circ; \quad (53)$$

$$|R O_{\text{Бi}}| = \frac{\text{Li}}{\cos u} \cdot \sin u ; \quad (54)$$

$$\angle Ti O Bi R - gi^{\circ} gi^{\circ} = mi^{\circ} - bi^{\circ} =$$

$$\cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш}+D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2}}{\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u} - \quad (55)$$

$$\cos^{-1} \frac{|O_{ш} O_{дi}|^2}{\left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{би}+di}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{би}+di}{2}\right)}$$

$$\text{угол } O Bi Ti R - ji^{\circ} ji^{\circ} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - gi^{\circ} = 90^{\circ} - gi^{\circ} = 90^{\circ}$$

$$-\cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш}+D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2}}{\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u} - \quad (56)$$

$$\cos^{-1} \frac{|O_{ш} O_{дi}|^2}{\left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{би}+di}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{би}+di}{2}\right)} \quad (57)$$

$$\angle O_{дi} Ei Ti = 90^{\circ}; \quad (58)$$

$$\angle O_{дi} Ti Ei - ti^{\circ} ti^{\circ} = ji^{\circ} \text{ (противолежащий, пересечение двух прямых)}. \quad (59)$$

$$Ei O_{дi} Ti - xi^{\circ} xi^{\circ} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - ti^{\circ} = 90^{\circ} - ti^{\circ} = 90^{\circ} - 90^{\circ}$$

$$-\cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш}+D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2}}{\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u} - \quad (60)$$

$$\cos^{-1} \frac{|O_{ш} O_{дi}|^2}{\left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{би}+di}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{ш}+d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в}+d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{би}+di}{2}\right)}$$

$$\text{угол } \angle O_{дi} O_{ш} Ui - ci^{\circ}; \quad (61)$$

$$\text{угол } \angle O_{ш} O_{дi} U - y^{\circ} y^{\circ} = k^{\circ} - x^{\circ}; \quad (62)$$

$$\text{угол } \angle O_{дi} Ui O_{ш} - zi^{\circ} zi^{\circ} = 180^{\circ} - ci^{\circ} - yi^{\circ}; \quad (63)$$

$$\frac{|O_{дi} Ui|}{\sin ci^{\circ}} = \frac{|O_{ш} O_{дi}|}{\sin zi^{\circ}}; \quad |O_{дi} Ui| = \frac{|O_{ш} O_{дi}|}{\sin zi^{\circ}} \cdot \sin ci^{\circ}. \quad (64)$$

$$\angle O_{дi} Pi Qi = 90^{\circ}; \quad (65)$$

$$\angle O_{дi} Qi Pi - wi^{\circ} wi^{\circ} = 90^{\circ} - ai^{\circ} \quad (66)$$

$$\angle Pi O_{дi} Qi - v^{\circ} vi^{\circ} = 180^{\circ} - 90^{\circ} - wi^{\circ} \quad (67)$$

Выведенные зависимости позволяют оценить изменения значений параметров в i -ом сечении рабочей зоне обработки методом проходного бесцентрового шлифования:

- расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов ($O_{ш}O_{вi}$);
- угла между линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов, и линией, соединяющей центры ведущего круга и заготовки (b_i);
- угла между линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов, и линией, соединяющей центры шлифовального круга и заготовки (c_i);
- расстояние между центром заготовки и линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов ($O_{дi}U_i$).

Проведенные теоретические исследования подтвердили необходимость учета взаимовлияния рассматриваемых характеристик и обосновывают необходимость в серьезной корректировке методических основ технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования, связанных с назначением наладочных параметров по данным о реальном состоянии элементов технологической системы [53].

В развитии научно-методической базы технологического обеспечения операций проходного бесцентрового шлифования, касающейся определения наладочных параметров с учетом реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок, проведены работы по установлению взаимосвязей между характеристиками обрабатываемой поверхности и компонентами технологической системы в пространстве всей рабочей зоны станка [53].

Предложенные формализованные модели дали возможность подтвердить и развить выдвинутые принципы разрабатываемых методических положений наладки технологических операций проходного бесцентрового шлифования, направленных на разработку систем автоматизированного проектирования технологических процессов и эффективного функционирования производственных систем, состоящих из групп бесцентрового шлифовального оборудования [53].

2.4 Анализ выполнения условия силового замыкания

В ходе проведённых исследований были выявлены пространственно-размерные связи, которые позволяют, с учётом характеристик конкретного оборудования и оснастки, рассчитать для каждого поперечного сечения в зоне обработки следующие параметры: углы наклона прямых, соединяющих центр обрабатываемой детали с центрами шлифовального и ведущего кругов; угол между этими прямыми; расстояние между горизонтальными осями шлифовального и ведущего круга в вертикальной плоскости; расстояния в вертикальной плоскости между центром обрабатываемой детали и горизонтальными линиями, проходящими через центры шлифовального и ведущего круга; расстояния в вертикальной плоскости между центром обрабатываемой детали и линией, соединяющей центры шлифовального и ведущего круга; координаты места контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа [53].

Созданные модели расширяют существующие подходы к формализованному назначению наладочных параметров бесцентрово-шлифовального оборудования и обеспечивают повышение уровня качества настроечных работ для схем проходного бесцентрового шлифования. Принципы, заложенные в разработанной методике расчёта, учитывающие варианты расположения осей кругов, являются универсальными и могут быть адаптированы для других схем бесцентрового шлифования. Результаты исследований являются частью работы по созданию системного подхода и разработке формализованных моделей, обеспечивающих автоматизацию и интеллектуализацию всех проектных процедур на этапах технологической подготовки операций, выполняемых на бесцентрово-шлифовальном оборудовании. Они затрагивают аспекты, связанные с установлением пространственно-размерных связей между элементами технологической системы, расширяющих возможности учёта факторов, влияющих на качество обработки. Полученные зависимости позволяют перейти к развитию известных научных исследований и практик, связанных с вопросами определения

силовых составляющих, возникающих в местах контакта детали с элементами технологической оснастки [63].

Созданные формализованные модели позволяют определить места контакта поверхности заготовки с шлифовальным и ведущим кругами, а также опорной поверхностью ножа в рабочей зоне станка, где выполняется настройка оборудования. На основе этой информации создана математическая модель, позволяющая объективно оценить качество настройки в части создания силового замыкания, что является одним из ключевых факторов обеспечения качества выполнения операций. На рисунке 2.9 представлена схема проходного бесцентрового шлифования наружной цилиндрической поверхности, на которой обозначены точки контакта в системе координат. Для оценки выполнения требования силового замыкания в рассматриваемом сечении рабочей зоны предлагается рассмотреть расположение точек контакта в двумерной системе координат. Формулы, представленные в работах [23,42,63], позволяют рассчитать координаты точек А, В и Р в горизонтальной и вертикальной плоскостях (Х и Y) [23,42,47,63].

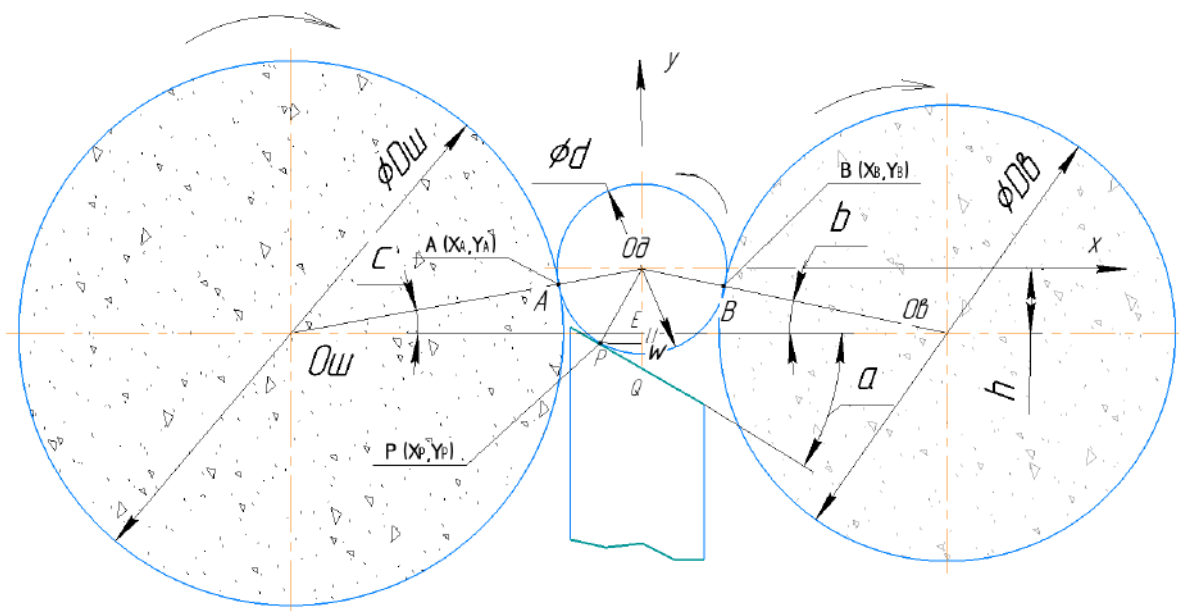


Рисунок 2.9 – Схема проходного бесцентрового шлифования с указанием координат точек контакта заготовки и элементов технологической оснастки

Для проверки требования, что все три точки лежат на одной окружности, запишем систему уравнений:

$$X_A^2 + Y_A^2 + 2 \cdot a \cdot X_A + 2 \cdot b \cdot Y_A + c = 0 \quad (68)$$

$$X_B^2 + Y_B^2 + 2 \cdot a \cdot X_B + 2 \cdot b \cdot Y_B + c = 0 \quad (69)$$

$$X_P^2 + Y_P^2 + 2 \cdot a \cdot X_P + 2 \cdot b \cdot Y_P + c = 0 \quad (70)$$

Выполнив подстановку с неизвестными переменными a, b, c:

$$2 \cdot X_A \cdot a + 2 \cdot Y_A \cdot b + c + X_A^2 + Y_A^2 = 0 \quad (71)$$

$$2 \cdot X_B \cdot a + 2 \cdot Y_B \cdot b + c + X_B^2 + Y_B^2 = 0 \quad (72)$$

$$2 \cdot X_P \cdot a + 2 \cdot Y_P \cdot b + c + X_P^2 + Y_P^2 = 0 \quad (73)$$

Представим систему уравнений в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} 2X_A & 2Y_A & 1 \\ 2X_B & 2Y_B & 1 \\ 2X_P & 2Y_P & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(X_A^2 + Y_A^2) \\ -(X_B^2 + Y_B^2) \\ -(X_P^2 + Y_P^2) \end{bmatrix} \quad (74)$$

Применение метода Гаусса для решения системы уравнений позволяет получить важную информацию:

- если решение не существует, то можно сделать вывод о том, что точки лежат на одной прямой. Это означает, что окружность через эти точки провести нельзя, что указывает на невыполнение условия силового замыкания [47];

- определение координат центра окружности и её радиуса, а также сравнение этих данных с допустимыми значениями для обрабатываемой поверхности и технологическим припуском позволяют сделать вывод о соблюдении условия силового замыкания.

Оценка условия силового замыкания невозможна без учета величины припуска, снимаемого в рассматриваемом сечении рабочей зоны обработки.

Операции проходного бесцентрового шлифования характеризуются неравномерным съемом припуска по длине обработки.

Для создания модели, которая позволяет определить распределение припуска в зоне обработки, требуется дополнительная информация по сравнению с традиционными методами [49]. В процессе продольного бесцентрового шлифования припуск играет ключевую роль в определении режимов резания. Это требует разработки дополнительных проектных процедур при технологической подготовке операций.

Наклон ведущего круга в вертикальной плоскости приводит к тому, что обрабатываемая поверхность контактирует с ведущим кругом в рабочей зоне в форме однополостного гиперболоида. Если сечение рабочей зоны проходит через центры кругов параллельно оси детали, то координаты и параметры кривой контактов можно определить на основе известных зависимостей [49].

Получена зависимость для определения составляющей припуска в i -ом сечении зоны обработки при конкретном значении диаметра ведущего круга

$$\Delta_{i D_B} = \frac{D_B}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{D_B^2 - L_i^2 (\tan \alpha)^2} \quad (75)$$

L_i - расстояние от сечения наладки до i -ого сечения рабочей зоны (мм).

Наиболее точным показателем, который демонстрирует связь между площадью обрабатываемой поверхности и габаритами деталей оборудования в рабочей зоне, является расстояние между центрами шлифовального и ведущего дисков. Зависимость между этим параметром и величиной припуска в сечениях обрабатываемой области была определена следующим образом [49]:

$$M_i^2 = M^2 + \left(\frac{L_i}{\cos \alpha} \cdot \sin \alpha \right)^2 ; L_i * \tan \alpha = \sqrt{M_i^2 - M^2} ; L_i = \frac{\sqrt{M_i^2 - M^2}}{\tan \alpha} . \quad (76)$$

M_i - расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов в i -ом сечении рабочей зоны (мм);

M - расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов в сечении наладки (мм).

$$\frac{\partial t_i}{\partial L_i} = \frac{dz - d_d}{L} ; \quad \int_0^{t_i} dt = \int_0^{L_i} \frac{dz - di}{L} dl ; \quad \int_{t_{i-1}}^{t_i} dt = \int_{L_{i-1}}^{L_i} \frac{d_{i-1} - d_i}{L} dl , \quad (77)$$

L - общая длина рабочей зоны обработки (высота шлифовального круга) (мм);

d_3 - диаметр заготовки обрабатываемой поверхности (перед выполнением перехода) (мм);

d_d - диаметр обработанной поверхности (после выполнения перехода) (мм);

t_i - величина припуска в i -ом сечении рабочей зоны (мм).

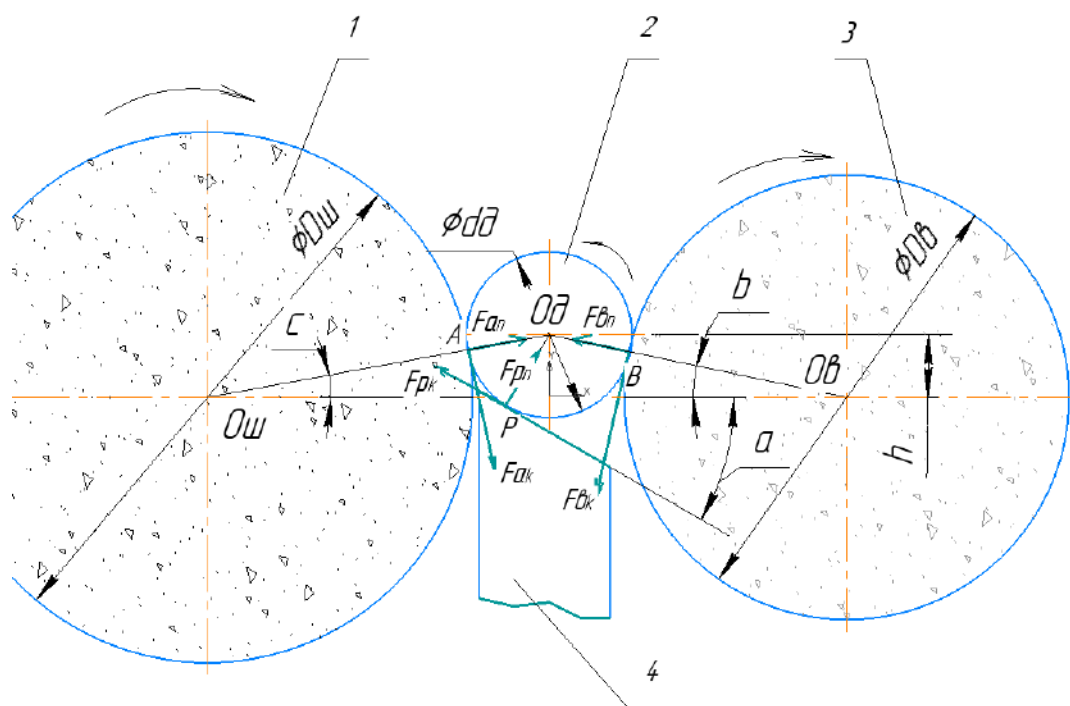
Полученные выражения позволяют не только определить размер припуска в конкретной зоне, но и рассчитать объём материала, который был удалён при обработке детали от начала шлифования до этой точки или между точками в рабочей зоне. Это позволяет получить исходные данные для расчёта сил, действующих в местах контакта, и выбора режимов обработки. Определение величины припуска и его распределение в зоне обработки в течение всего технологического процесса не ограничивается только этими условиями. В отличие от других методов механической обработки цилиндрических поверхностей, при бесцентровом шлифовании необходимо учитывать не только принцип технологической наследственности, но и ряд других важных факторов. При снятии припуска с определённой части поверхности деталь перемещается даже в пределах одного оборота. Глубина резания не постоянна, а припуск влияет на выполнение требования силового замыкания. Изменение величины припуска по-разному влияет на эти факторы, поэтому расчёт припуска должен быть комплексным, учитывающим все аспекты [49].

2.5 Формирование схемы сил в процессе обработки заготовки и назначение технологических режимов

Качественное и эффективное выполнение технологических операций невозможно без полного комплексного учета влияющих факторов на всех стадиях их проектирования и реализации. Применительно к операциям проходного бесцентрового шлифования установление взаимосвязей между назначением

технологической оснастки, определением режимов резания, методов настройки оборудования и управления ходом реализации обработки невозможно без детального установления и исследования сил, возникающих в местах контакта обрабатываемой детали и элементов технологической системы. Результаты известных исследований по данному направлению [3,20,58,67,78,83,92] преимущественно направлены на установление движения детали в процессе обработки, что не только не учитывают ряд факторов (изменение диаметра обрабатываемой поверхности с учетом величины снимаемого припуска, постоянная корректировка расположения точек контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа, шлифовальном и ведущем кругами и др.), но и не позволяют создать модель взаимовлияния составляющих сил между собой. Учитывая требование силового замыкания в схеме обработки деталей при бесцентровом шлифовании, не имея таких методик, развитие рассматриваемых методов обработки, выделяющихся высокой производительностью и обеспечением повышенных требований к геометрическим характеристикам обрабатываемых поверхностей [23], серьезно сдерживается.

В основе предлагаемого метода лежит исследование сил, действующих в местах контакта, что позволяет создать общую модель, которая определяет взаимовлияние между этими силами. В процессе обработки поверхности происходит контакт в трёх точках (см. рисунок 2.10): с шлифовальным кругом (точка А), ведущим кругом (точка В) и опорным ножом (точка Р).



1 – шлифовальный круг, 2 – обрабатываемая деталь, 3 – ведущий круг,
4 – опорный нож

Рисунок 2.10 – Схема сил при проходном бесцентровом шлифовании
(центры осей кругов расположены на горизонтальной прямой)

При рассмотрении контактов в поперечных сечениях зоны обработки проходного бесцентрового шлифования наружных цилиндрических поверхностей, когда центры ведущего и шлифовального кругов расположены не на одной горизонтальной прямой, направления сил изменяются рис. 2.11 [23].

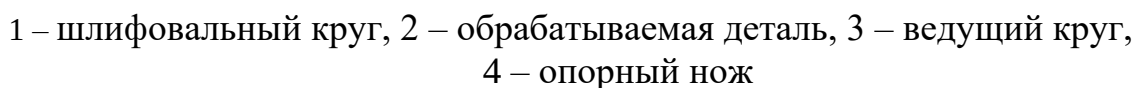


Рисунок 2.11 – Схема сил при проходном бесцентровом шлифовании (центры осей кругов расположены не на горизонтальной прямой)

Для описания обобщенной модели силовых схем при проходном бесцентровом шлифовании приведена детализация составляющих сил, возникающих в процессе реализации проходного бесцентрового шлифования.

В рассматриваемой системе нормальные силы F_n [н] возникающие в местах контакта, зависят от массы обрабатываемой детали m [кг] и местоположения контактов. В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, при расположении центров кругов на одной горизонтальной линии (рис. 2.12) влияние каждого места соответствует проекции силы на направление гравитационного поля g [$\frac{м}{с^2}$]:

$$\text{FAn} - kAn = \frac{\frac{d}{2} \cdot \sin c^\circ}{\frac{d}{2} \cdot \sin c^\circ + \frac{d}{2} \cdot \sin b^\circ + \frac{d}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \quad , \quad (78)$$

$$FB_n - kB_n = \frac{\frac{d}{2} \cdot \sin b^\circ}{\frac{d}{2} \cdot \sin c^\circ + \frac{d}{2} \cdot \sin b^\circ + \frac{d}{2} \cdot \cos (90^\circ - a^\circ)} ; \quad (79)$$

$$FP_n - kP_n = \frac{\frac{d}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}{\frac{d}{2} \cdot \sin c^\circ + \frac{d}{2} \cdot \sin b^\circ + \frac{d}{2} \cdot \cos (90^\circ - a^\circ)} . \quad (80)$$

где: d – диаметр обрабатываемой поверхности [м], a° – угол наклона опорной поверхности ножа [град].

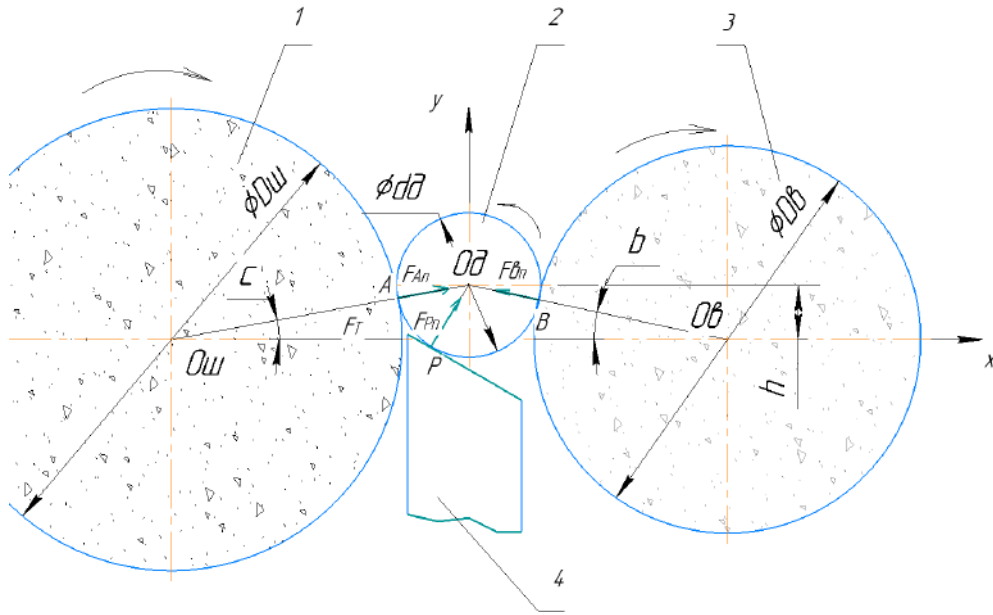


Рис.2.12 Схема нормальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Учитывая значение угла между поверхностью или касательной к поверхности контакта по отношению к горизонтальной плоскости:

$$F_{An} = k_{An} \cdot m \cdot g \cdot \cos (90^\circ - c^\circ) ; \quad (81)$$

$$F_{Bn} = k_{Bn} \cdot m \cdot g \cdot \cos (90^\circ - b^\circ) ; \quad (82)$$

$$F_{Pn} = k_{Pn} \cdot m \cdot g \cdot \cos a^\circ . \quad (83)$$

Составляющие нормальных сил на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$F_{Anx} = F_{An} \cdot \cos c^\circ , \quad F_{Any} = F_{An} \cdot \sin c^\circ ; \quad (84)$$

$$FB_{nx} = FB_n \cdot \cos b^\circ, \quad FB_{ny} = FB_n \cdot \sin b^\circ; \quad (85)$$

$$FP_{nx} = FP_n \cdot \sin (90^\circ - \alpha^\circ), \quad FP_{ny} = FP_n \cdot \cos (90^\circ - \alpha^\circ). \quad (86)$$

Нормальные силы в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки в других сечениях рабочей зоны рассчитывается аналогично с учетом динамического изменения мест контактов, диаметра обрабатываемой поверхности и, соответственно, значений углов (рис.2.13), входящих в представленные формулы [23]. Корректировка этих данных определяет ориентацию обрабатываемой поверхности относительно координатной системы оборудования.

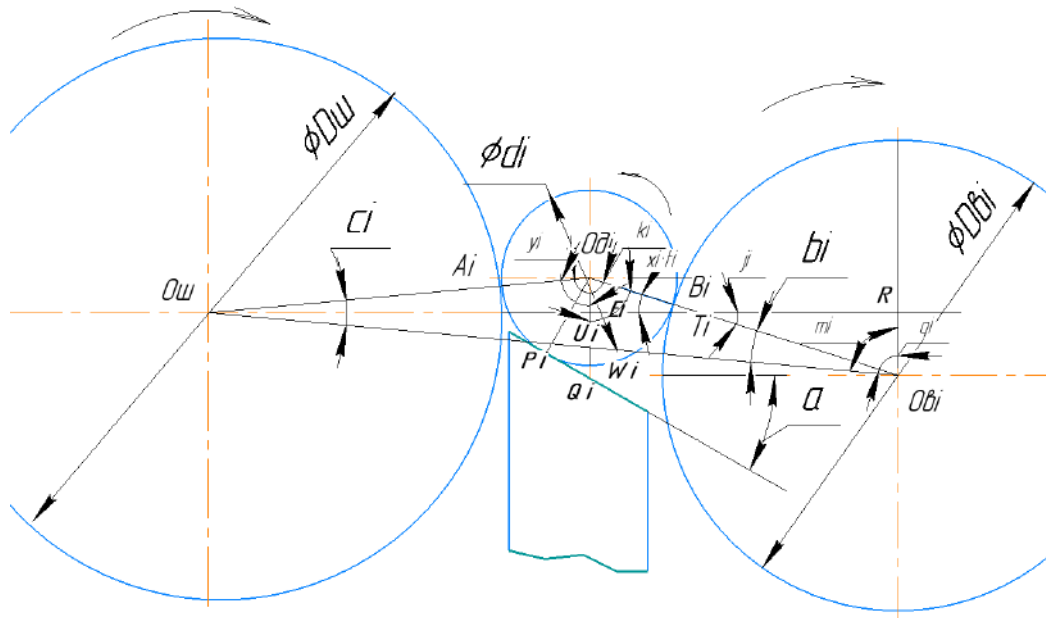


Рис.2.13 Схема нормальных сил при проходном бесцентровом шлифовании
(в i -ом сечении рабочей зоны)

Для определения в i -ом сечении рабочей зоны обработки нормальных сил выведены зависимости:

$$FA_{in} - kA_in = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - \alpha^\circ)}, \quad (87)$$

$$FA_{in} = kA_in \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ);$$

$$FA_{inx} = FA_{in} \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ), \quad FA_{iny} = FA_{in} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ); \quad (88)$$

$$FB_{in} - kB_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ))}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}, \quad (89)$$

$$\begin{aligned} FB_{in} &= kB_{in} \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - m_i^\circ); \\ FB_{inx} &= FB_{in} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), \\ FB_{iny} &= FB_{in} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)); \end{aligned} \quad (90)$$

$$FP_{in} - kP_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}, \quad (91)$$

$$\begin{aligned} FP_{in} &= kP_{in} \cdot m \cdot g \cdot \cos a^\circ; \\ FP_{inx} &= FP_{in} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ), \quad FP_{iny} = FP_{in} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ). \end{aligned} \quad (92)$$

Тангенциальные силы, возникающие в местах контакта (рис.2.14), взаимосвязаны между собой и зависят от назначенных технологических режимов обработки, реальных размеров обрабатываемой поверхности и кругов, расположения детали в зоне обработки. Характерной спецификой при рассмотрении схемы сил при проходном бесцентровом шлифовании, является учет условия относительного движения соприкасающихся тел в местах контакта. Окружная сила, возникающая в месте контакта обрабатываемой поверхности и опорного ножа, зависит от скорости вращения и характеристик обрабатываемой детали и может быть определена: $F_{P_T} = \frac{T}{d/2}$, где: T_d - крутящий момент $[H \cdot m]$, $T_d = J \cdot \frac{\omega^2}{2}$; $J [kg \cdot m^2]$ - момент инерции для детали (элемента детали) сплошной формы $J = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (d/2)^2$ или J - момент инерции для полый детали (элемента детали), $J = m \cdot \frac{(d_1/2)^2 + (d_2/2)^2}{2}$, $d_1/2$, $d_2/2$ внешний и внутренний радиусы цилиндрических поверхностей детали; ω_d - угловая скорость обрабатываемой поверхности $[\frac{рад}{с}]$, $\omega_d = 2\pi \cdot V_d$, V_d - скорость вращения обрабатываемой поверхности $[\frac{м}{с}]$.

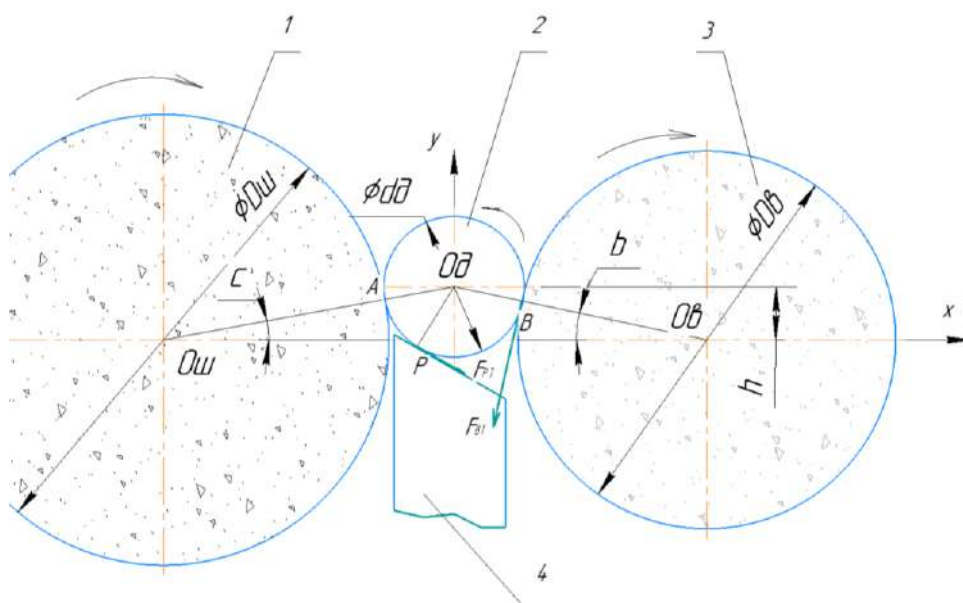


Рис. 2.14 Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (расположении центров кругов на одной горизонтальной линии)

Направление окружной силы в месте контакта детали и ведущего круга имеет направление относительного смещения поверхностей. Рассматривается случай, при котором скорость вращения обрабатываемой поверхности больше скорости вращения ведущего круга. $F_{Bm} = \frac{T_{D_6}}{D_6/2}$, где: D_6 - диаметр ведущего круга [м],

$T_{D_6} = \frac{P_6}{\omega_d - \omega_{D_6}}$, P_6 - мощность на валу ведущего круга [Вт], $\omega_{D_6} = 2\pi \cdot V_{D_6}$, V_{D_6} - скорость вращения ведущего круга $[\frac{м}{с}]$.

Крутящий момент ведущего круга можно также рассчитать посредством определения момента инерции ведущего круга и оправки, на которую крепится круг.

Абсолютные значения составляющих тангенциальных сил на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$F_{Btx} = F_{Bt} \cdot \sin b^\circ, \quad F_{Bty} = F_{Bt} \cdot \cos b^\circ; \quad (93)$$

$$F_{Ptx} = F_{Pn} \cdot \cos (90^\circ - \alpha^\circ), \quad F_{Pty} = F_{Pn} \cdot \sin (90^\circ - \alpha^\circ). \quad (94)$$

В i-ом сечении рабочей зоны обработки:

$$F_{P_{iT}} = \frac{T_{d_i}}{d_{i/2}}, \quad T_{d_i} = J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{2}, \quad J_i = \frac{1}{2} \cdot m_i \cdot (d_i/2)^2. \quad (95)$$

$$F_{P_{iTx}} = F_{P_{iT}} \cdot \cos(90^\circ - \alpha^\circ), \quad F_{P_{iTy}} = F_{P_{iT}} \cdot \sin(90^\circ - \alpha^\circ). \quad (96)$$

$$F_{B_{iT}} = \frac{T_{D_{iB}}}{D_{iB/2}}, \quad T_{D_{iB}} = \frac{P_B}{\omega_{d_i} - \omega_{D_{iB}}}, \quad \omega_{D_{iB}} = 2\pi \cdot V_{D_{iB}}, \quad \omega_{d_i} = 2\pi \cdot V_{d_i}. \quad (97)$$

$$F_{B_{iTx}} = F_{B_{iT}} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), \quad F_{B_{iTy}} = F_{B_{iT}} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)). \quad (98)$$

Силы трения скольжения, возникающие в местах контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом и поверхностью опорного ножа, направлены вдоль касательной к трущимся поверхностям в направлении противодействия относительному смещению поверхностей (рис.2.15).

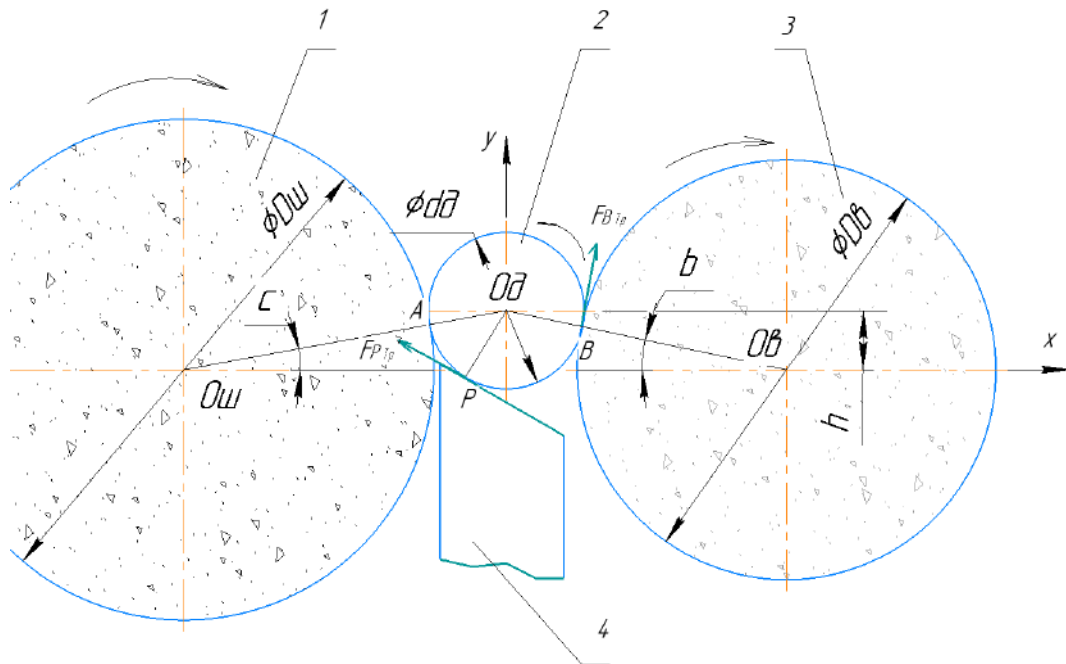


Рис.2.15 Схема тангенциальных сил при проходном бесцентровом шлифовании (в i -ом сечении рабочей зоны)

Принимаем, что величина сил зависит от прижимающей силы и скорости движения тел относительно друг друга и не зависит в соответствии с законом Кулона от величины площади трущихся поверхностей.

В сечении, в котором выполняется наладка оборудования, сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с ведущим кругом $F_{B_{mp}} = FB_n \cdot \mu_{д-в} \cdot g \cdot \beta_{д-в}$, где: $\mu_{д-в}$ - коэффициент трения между обрабатываемой деталью и ведущим кругом преимущественно зависящий от их материала и структуры ведущего круга; $\beta_{д-в}$ - коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и ведущим кругом, учитывающий состояние поверхностей, условий смазки и скоростей вращения.

Сила трения скольжения в месте контакта обрабатываемой поверхности с опорной поверхностью установочного ножа $F_{P_{mp}} = FP_n \cdot \mu_{д-н} \cdot g \cdot \beta_{д-н}$, где: $\mu_{д-н}$ - коэффициент трения между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа; $\beta_{д-н}$ - коэффициент сцепления между обрабатываемой деталью и опорной поверхностью ножа.

Абсолютные значения составляющих сил трения скольжения на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y):

$$FB_{трx} = F_{B_{тр}} \cdot \cos(90^\circ - b^\circ), \quad FB_{тры} = F_{B_{тр}} \cdot \sin b^\circ; \quad (99)$$

$$FP_{трx} = F_{P_{тр}} \cdot \sin a^\circ, \quad FP_{тры} = F_{P_{тр}} \cdot \cos a^\circ. \quad (100)$$

В сечениях рабочей зоны обработки:

$$FB_{i_{тр}} = FB_{in} \cdot \mu_{д-в} \cdot g \cdot \beta_{д-в}; \quad FP_{i_{тр}} = FP_{in} \cdot \mu_{д-н} \cdot g \cdot \beta_{д-н}; \quad (101)$$

$$FB_{i_{тр}x} = FB_{i_{тр}} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), \quad (102)$$

$$FB_{i_{тр}y} = FB_{i_{тр}} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ));$$

$$FP_{i_{тр}x} = FP_{i_{тр}} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ), \quad FP_{i_{тр}y} = FP_{i_{тр}} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ). \quad (103)$$

В качестве методического подхода для расчета силового взаимодействия в месте контакта шлифовального круга с поверхностью детали использовались результаты исследований [8,27], основанные на изучении микрорезания единичными зернами с учетом влияния сопротивления материала обрабатываемой

поверхности процессам пластического деформирования и трения. Снятие стружки вершиной абразивного зерна сопровождается возникновением силы резания F_p , являющейся геометрической суммой тангенциальной $F_{p\ m}$ и нормальной $F_{p\ n}$ составляющих. Каждая из которых включает в себя: силу сдвига F_{p_s} (в плоскости сдвига), силу трения $F_{p_{tr}}$ по задней поверхности зерна, инерционную силу стружки $F_{p_{ин}}$.

$$F_{p_s\ t} = \frac{\tau_s \cdot Q_{cp} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ}; \quad F_{p_s\ n} = \frac{\tau_s \cdot Q_{cp} \cdot \cos(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \quad (104)$$

где: τ_s - напряжение сдвига [Па]; Q_{cp} - площадь сечения среза [мм²]; δ - угол при вершине режущей кромки [град]; φ_s - угол трения [град] $\varphi_s = \tan^{-1}(\mu_s)$; μ_s - коэффициент внутреннего трения в плоскости сдвига.

$F_{p_{mp\ m}} = \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot a_z}{\mu_s}$, где: ρ - средний радиус округления вершины [мм], a_z - глубина резания [мм].

Зависимости для определения инерционных сил, учитывающих инерцию стружки при изменении направления материала при переходе от обрабатываемой заготовки к стружке, позволяют вычислить тангенциальную составляющую как произведение «секундной» массы движущегося материала на изменение скорости его движения в тангенциальном направлении [27].

$$F_{p_{ин\ t}} = Q_{cp} \cdot q_m \cdot V_k^2 \cdot \left(\frac{1 - \sin \delta^\circ \cdot \sin \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right);$$

$$F_{p_{ин\ n}} = Q_{cp} \cdot q_m \cdot V_k^2 \cdot \left(\frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right), \quad (105)$$

где: q_m - плотность материала [$\frac{H}{M^2}$]; $Q_{cp} \cdot q_m \cdot V_k$ - «секундная» масса движущегося материала; $V_{сек}$ - скорость движения стружки [$\frac{M}{c}$]

$$V_{сек} = V_k \cdot \sin \delta^\circ / \cos(\delta^\circ - \gamma^\circ). \quad (106)$$

При реализации рассматриваемого метода проходного бесцентрового шлифования V_k принимается как относительная скорость, учитывающая окружные скорости шлифовального круга и обрабатываемой поверхности.

Величины составляющих сил определяются суммированием составляющих сил сдвига, трения и инерции:

$$F_{p\tau} = F_{p_s\tau} + F_{p_{тр}\tau} + F_{p_{ин}\tau}; \quad F_{p_s n} = F_{p_s n} + F_{p_{тр}n} + F_{p_{ин}n}. \quad (107)$$

Определение общей тангенциальной составляющей силы резания в месте контакта выполняется с учетом анализа условия перехода процесса от пластического деформирования металла к резанию $a_{z\min}/\rho$, $a_{z\min}$ [мм] – минимальная толщина среза, при котором зерна еще снимают стружку.

$F_{p\tau} = F_{p_{рез}\tau} + F_{p_{пл}\tau}$, где: $F_{p_{рез}}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна; $F_{p_{пл}}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая на зерна, совершающие только пластическое деформирование металла [27].

Теоретические модели расчета сил резания, возникающих в местах контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью [16] построены с учетом следующих допущений: число зерен, участвующих в процессе шлифования, колеблется в небольших пределах и принимается постоянным N_z ; усилие пластической деформации $F_{пл}$, действующей на единичное абразивное зерно, принимается пропорциональным площади среза $Q_{ср}$, $F_{пл} = \sigma_T \cdot Q_{ср}$; сила трения действует на все контактирующие зерна и рассматривается отдельно от сил $F_{пл}$, $F_{рез}$ [27].

Тангенциальная сила резания в зоне шлифовального круга с заготовкой $F_{p\tau} = F_{p_{рез}\tau} + F_{p_{пл}\tau} + F_{p_{тр}\tau}$, где: $F_{p_{рез}}$ – суммарная тангенциальная сила резания, действующая только на режущие зерна и определяющаяся силой сдвига и силой инерции стружки без учета силы трения [27].

$$F_{p \text{ т (рез ин)}} = \sum_{i=1}^{N_{z \text{ рез}}} F_{p \text{ с}} + \sum_{i=1}^{N_{z \text{ рез}}} F_{p \text{ ин}} , \quad (108)$$

$$F_{p \text{ т (пл)}} = \sum_{i=1}^{N_{z \text{ деф}}} F_{p \text{ пл}} = \sum_{i=1}^{N_{z \text{ деф}}} \sigma_T \cdot Q_{cp}, \quad (109)$$

$$F_{p \text{ т (тр)}} = \sum_{i=1}^{N_z} F_{p \text{ тр}} , \quad (110)$$

где: $N_{z \text{ рез}}$, $N_{z \text{ деф}}$ - количество режущих и деформирующих зерен на единицу площади круга, определяемым по методике [27].

Выражение, для определения площади контакта круга с заготовкой:

$S_k = l_d \cdot s = \sqrt{D \cdot t \cdot s}$, где: s – поперечная подача [], D - диаметр круга [мм], t - глубина резания [мм], l_d - длина дуги контакта [мм],

позволяет преобразовать зависимости в вид, удобный для использования в инженерной практике:

$$F_{p \text{ т (рез ин)}} = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z \text{ рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot \left(a_{z_{np}}^{5/2} - a_{z_{min}}^{5/2} \right) \cdot \quad (111)$$

$$\left\{ g_m \cdot V_k^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} ;$$

$$F_{p \text{ т (пл)}} = \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{z_{min}}^{5/2} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot N_{z \text{ деф}} ; \quad (112)$$

$$F_{p \text{ т (тр)}} = \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{z_{np}}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t}}{\mu_s} . \quad (113)$$

$$F_{p \text{ т}} = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z \text{ рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot \left(a_{z_{np}}^{5/2} - a_{z_{min}}^{5/2} \right) \cdot \quad (114)$$

$$\left\{ g_m \cdot V_k^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} + \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{z_{min}}^{5/2} \cdot$$

$$s \cdot \sqrt{D \cdot t} \cdot N_{z \text{ деф}} + \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{z_{np}}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t}}{\mu_s} .$$

Силы резания в i -ом сечении рабочей зоны обработки:

$$F_{p \text{ т (рез ин)}}_i = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z \text{ рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot \left(a_{z_{np}}^{5/2} - a_{z_{min}}^{5/2} \right) \cdot \quad (115)$$

$$\left\{ g_m \cdot V_{k_i}^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp_i} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} ,$$

$$F_{p \tau (пл)_i} = \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{zmin}^{5/2} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot N_{z \text{ деф}} , \quad (116)$$

$$F_{p \tau (тр)_i} = \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{znp}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i}}{\mu_s} . \quad (117)$$

$$F_{p \tau i} = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z \text{ рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot \left(a_{znp}^{5/2} - a_{zmin}^{5/2} \right) .$$

$$\left\{ g_m \cdot V_{ki}^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp_i} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} + \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{zmin}^{5/2} \cdot \quad (118)$$

$$s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot N_{z \text{ деф}} + \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{znp}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i}}{\mu_s} .$$

Описанный метод анализа сил, воздействующих между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью, предоставляет возможность наиболее исчерпывающе учесть все факторы, которые могут оказать влияние на процесс обработки. Абсолютные значения составляющих сил резания в сечении рабочей зоны обработки, в которой центры шлифовального и ведущего кругов расположены на одной горизонтальной линии, на горизонтальную (x) и вертикальную оси (y) [62]:

$$F_{p \tau y} = F_{p \tau} \cdot \cos(\beta^\circ - c^\circ) , \quad F_{p \tau x} = F_{p \tau} \cdot \sin(\beta^\circ - c^\circ) ; \quad (119)$$

$$F_{p_{тр} y} = F_{p_{тр}} \cdot \sin(c^\circ + \varphi_s^\circ) , \quad F_{p_{тр} x} = F_{p_{тр}} \cdot \cos(c^\circ + \varphi_s^\circ) ; \quad (120)$$

$$F_{p_{ин} y} = F_{p_{ин}} \cdot \cos(\beta^\circ + \gamma^\circ - c^\circ) , \quad (121)$$

$$F_{p_{ин} x} = F_{p_{ин}} \cdot \sin(\beta^\circ + \gamma^\circ - c^\circ) .$$

В i-ом сечении рабочей зоны обработки с учетом расположения места контакта:

$$F_{p \tau i y} = F_{p \tau i} \cdot \cos(\beta^\circ - ((90^\circ - \gamma_i^\circ)) , \quad (122)$$

$$F_{p \tau i x} = F_{p \tau i} \cdot \sin(\beta^\circ - ((90^\circ - \gamma_i^\circ)) ;$$

$$F_{p_{тр} i y} = F_{p_{тр} i} \cdot \sin((90^\circ - \gamma_i^\circ) + \varphi_s^\circ) , \quad (123)$$

$$F_{p_{тр} i x} = F_{p_{тр} i} \cdot \cos((90^\circ - \gamma_i^\circ) + \varphi_s^\circ) ;$$

$$F_{p_{ин}iy} = F_{p_{ин}i} \cdot \cos (\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - \gamma_i^\circ)) , \quad (124)$$

$$F_{p_{ин}ix} = F_{p_{ин}i} \cdot \sin (\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - \gamma_i^\circ)) . \quad (125)$$

Важно учитывать сложные взаимосвязи между всеми составляющими сил в процессе обработки и множество факторов, влияющих на них: размерные характеристики обрабатываемой поверхности и элементов технологической системы в рабочей зоне; структура и материал абразивного зерна шлифовального круга; материал ведущего круга; частота вращения ведущего и шлифовальных кругов; относительная скорость резания абразивными зёрнами при попутном шлифовании; режущая способность шлифовального круга; наладочные размеры; форма ведущего круга; использование технологических жидкостей; материал и величина припусков обрабатываемой детали [23].

Анализ составляющих сил, возникающих в местах контакта обрабатываемой детали с элементами технологической системы, позволяет установить взаимосвязи между ними и сформировать систему формализованных моделей влияния различных факторов на качественные показатели и технико-экономические характеристики проходного бесцентрового шлифования. Эти зависимости обеспечивают объективное определение рациональных параметров настройки и управления проходными бесцентрово-шлифовальными операциями с учётом реального состояния и конструктивных особенностей оборудования и средств технологического оснащения [23]. В процессе определения оптимальных технологических режимов необходимо учитывать не только пространственные связи в местах обработки и контактов, но и силовые взаимодействия между этими элементами. Одним из ключевых факторов, влияющих на учёт этих взаимосвязей, является величина припуска, назначаемого на технологический переход, а также его распределение в процессе обработки в различных областях сечений рабочей зоны. Механизм распределения величины, снимаемого в рамках одного перехода припуска в зоне обработки для операций бесцентрового шлифования, имеет принципиальное отличие от других методов обработки. Динамично изменяющиеся

размер обрабатываемой поверхности и мест её контакта с элементами технологической оснастки являются следствием изменения относительного позиционирования детали в координатной системе станка. Этот фактор, помимо чисто геометрического обоснования непостоянства величины припуска, также является предпосылкой для изменения возникающих в процессе обработки сил. Происходит постоянное перестроение силовой схемы контактов как по их направлению, так и величинам, что приводит к изменению интенсивности взаимодействия абразивного круга с обрабатываемой поверхностью [49].

Анализ входящих в представленные зависимости составляющих, позволил сделать заключение об учете всех значимых факторов, оказывающих влияние на процесс обработки при проходном бесцентровом шлифовании, определяющим технико-экономические показатели качественных характеристик и производительности выполнения производственных операций. Учитываются как параметры неизменные для конкретного технологического перехода: свойства материала, конструктивные особенности, размерные характеристики детали и непосредственно обрабатываемой поверхности; структура кругов и выбранный абразивный материал; выбранные варианты технологических режимов (частота вращения кругов, угол наклона опорной поверхности установочного ножа, общий припуск на переход), компоновочные и кинематические данные приводов станочного оборудования. Так и параметров, зависящих от реального состояния заготовки, средств технологического оснащения, характеристик наладки; конкретные размеры шлифовального и ведущего кругов; состояния поверхностного слоя обрабатываемой поверхности с учетом фактора технологической наследственности, в части влияния предшествующих операций обработки [53]; изменения скорости вращения заготовки и скорости резания в различных рабочих зонах обработки; величины общего припуска и распределения его составляющих на отдельных участках рабочей зоны; мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологического обеспечения. Это позволяет спроектировать для широкого круга исследовательских и инженерных

задач систему условий для обоснованного рационального определения технологических параметров выполнения операций проходного бесцентрового шлифования.

При выполнении проектной процедуры назначения технологических режимов обработки результаты выполненных исследований представляются в виде системы уравнений и неравенств, для определения допустимого множества величин значений, обеспечивающих заданные показатели при выполнении технологической операции в обобщенном виде модели:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 FA_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ) \\
 F_{B_{iT}} = \frac{\frac{P_B}{\omega_{d_i} - \omega_{D_{iB}}}}{D_{iB}/2} \\
 FB_{i_{TP}} = FB_{in} \cdot \mu_{д-в} \cdot g \cdot \beta_{д-в} \\
 FB_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ))}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - m_i^\circ) \\
 FP_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos a^\circ \\
 F_{P_{iT}} = \frac{J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{2}}{d_i/2} \\
 FP_{i_{TP}} = FP_{in} \cdot \mu_{д-н} \cdot g \cdot \beta_{д-н} \\
 F_{p \text{ т (рез ин)}}_i = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z \text{ рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot \left(a_{z_{np}}^{5/2} - a_{z_{min}}^{5/2} \right) \cdot \\
 \left\{ g_m \cdot V_{k_i}^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp_i} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} \\
 F_{p \text{ т (пл)}}_i = \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{z_{min}}^{5/2} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot N_{z \text{ деф}} \\
 F_{p \text{ т (тр)}}_i = \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{z_{np}}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i}}{\mu_s}
 \end{array} \right. \quad (126)$$

Для выполнения проектных технологических процедур, требующих анализа составляющих сил в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, преимущественно связанных с необходимостью учета

жесткости отдельных конструктивных элементов станочной система может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned}
 &FA_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ) \\
 &FA_{inx} = FA_{in} \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ) \\
 &FA_{iny} = FA_{in} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) \\
 &F_{B_{iT}} = \frac{\frac{P_B}{\omega_{d_i} - \omega_{D_{iB}}}}{D_{iB}/2} \\
 &FB_{iTx} = FB_{iT} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FB_{iTy} = FB_{iT} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FB_{iTp} = FB_{iT} \cdot \mu_{д-в} \cdot g \cdot \beta_{д-в} \\
 &FB_{iTp}x = FB_{iTp} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FB_{iTp}y = FB_{iTp} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FB_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ))}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos(90^\circ - m_i^\circ) \\
 &FB_{inx} = FB_{in} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FB_{iny} = FB_{in} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
 &FP_{in} = \frac{\frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)}{\frac{d_i}{2} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) + \frac{d_i}{2} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) + \frac{d_i}{2} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ)} \cdot m \cdot g \cdot \cos a^\circ \\
 &FP_{inx} = FP_{in} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ) \\
 &FP_{iny} = FP_{in} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ) \\
 &F_{P_{iT}} = \frac{J_i \cdot \frac{\omega_i^2}{2}}{d_i/2} \\
 &FP_{iTx} = F_{P_{iT}} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ) \\
 &FP_{iTy} = F_{P_{iT}} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ) \\
 &FP_{iTp} = FP_{in} \cdot \mu_{д-н} \cdot g \cdot \beta_{д-н} \\
 &F_{p\tau}(\text{резин})_i = \frac{4}{5} \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot N_{z\text{рез}} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot (a_{znp}^{5/2} - a_{zmin}^{5/2}) \cdot \\
 &\left\{ g_m \cdot V_{k_i}^2 \left[1 - \frac{\sin \delta^\circ \cdot \cos \gamma^\circ}{\cos(\delta^\circ - \gamma^\circ)} \right] \cdot 10^{-3} + \frac{\tau_s \cdot Q_{cp_i} \cdot \sin(\delta^\circ + \varphi_s^\circ)}{\sin \delta^\circ \cdot \sin \varphi_s^\circ} \right\} \\
 &F_{p\tau}(\text{пл})_i = \frac{4}{5} \cdot \sigma_T \cdot \sqrt{2 \cdot \rho} \cdot a_{zmin}^{5/2} \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i} \cdot N_{z\text{деф}} \\
 &F_{p\tau}(\text{тр})_i = \frac{\tau_s \cdot \pi \cdot \rho \cdot \mu \cdot a_{znp}^2 \cdot N_z \cdot s \cdot \sqrt{D \cdot t_i}}{\mu_s} \\
 &F_{p\tau i y} = F_{p\tau i} \cdot \cos(\beta^\circ - ((90^\circ - y_i^\circ))) \\
 &F_{p\tau i x} = F_{p\tau i} \cdot \sin(\beta^\circ - ((90^\circ - y_i^\circ))) \\
 &F_{p\tau p i y} = F_{p\tau p i} \cdot \sin((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ) \\
 &F_{p\tau p i x} = F_{p\tau p i} \cdot \cos((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ) \\
 &F_{p\text{ин} i y} = F_{p\text{ин} i} \cdot \cos(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)) \\
 &F_{p\text{ин} i x} = F_{p\text{ин} i} \cdot \sin(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ))
 \end{aligned} \right. \quad (127)$$

Полученные результаты взаимосвязанной системы составляющих сил процесса проходного бесцентрового шлифования во всех участках рабочей зоны обработки позволяют перейти к решению широкого спектра проектных задач на этапах разработки и реализации технологических операций, в частности обоснование назначения технологических режимов обработки.

Большинство известных зависимостей, определяющих влияние скорости резания на составляющие силы резания при бесцентровом шлифовании, охватывают только отдельные условия обработки и основаны преимущественно на экспериментальных данных. Связи с тем, что сила резания при шлифовании имеет широкий диапазон варьирования в зависимости от припуска, технологических условий обработки, материала заготовки и структуры абразивного инструмента, в качестве наиболее обобщенной характеристикой процессов в зоне контакта зерен с металлом рассматривается соотношение $F_{p\ m} / F_{p\ n}$. И зависимости, устанавливающей посредством величины съема металла на единицу силы резания связь скорости резания с составляющей силы. $F_{p\ m} \approx \left(1/F_{p\ n}\right)^{k_3}$, где: k_3 – коэффициент, зависящий от зернистости абразивного материала (0.79.....1.47).

Перечисленные сведения и известные в научно-технической литературе зависимости устанавливающие связь между силами резания и режимами абразивной обработки с использованием полученных в работе результатов, позволяют сформировать систему уравнений и неравенств для определения параметров режимов обработки методом проходного бесцентрового шлифования с учетом силовых схем взаимодействия заготовки и оборудования

$$\left\{ \begin{array}{l}
FA_{inx} = FA_{in} \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ), FA_{iny} = FA_{in} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) \\
FB_{inx} = FB_{in} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{iny} = FB_{in} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
FP_{inx} = F_{n P_i} \cdot \sin(90^\circ - \alpha^\circ), FP_{iny} = F_{P_i n} \cdot \cos(90^\circ - \alpha^\circ) \\
FP_{iTx} = F_{P_{iT}} \cdot \cos(90^\circ - \alpha^\circ), FP_{iTy} = F_{P_{iT}} \cdot \sin(90^\circ - \alpha^\circ) \\
FB_{iT x} = FB_{iT} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{iT y} = FB_{iT} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
FB_{iTp x} = FB_{iTp} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{iTp y} = FB_{iTp} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\
FP_{iTp x} = F_{P_{iTp}} \cdot \cos(90^\circ - \alpha^\circ), FP_{iTp y} = F_{P_{iTp}} \cdot \sin(90^\circ - \alpha^\circ) \\
F_{i p_{Ty}} = F_{p_T} \cdot \cos(\beta^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)), F_{i p_{Tx}} = F_{p_T} \cdot \sin(\beta^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)) \\
F_{i p_{Ty}} = F_{p_{Tp}} \cdot \sin((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ), F_{i p_{Tx}} = F_{p_{Tp}} \cdot \cos F_{p_{Tp}} \cdot \sin((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ) \\
F_{i p_{ин y}} = F_{p_{ин}} \cdot \cos(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)), F_{i p_{ин x}} = F_{p_{ин}} \cdot \sin(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)) \\
F_{p_T} \approx \left(1/V_{ш}\right)^{k_3} \\
V_{si} = V_{Bi} \cdot \sin \alpha \cdot k_{пп i} \\
V_s = \frac{\sum_{i=1}^I V_{si}}{I}, V_{si} > V_{s(i-1)} \text{ или } V_{si} \geq V_{s(i-1)} - (V_{s(i-1)} - V_{si}) \\
N_{ст} \cdot \eta_{ст} > \sum_{i=1}^I N_{пез i} \\
N_{пр} \geq 0,0039 \left(\frac{\pi \cdot d_{3i} \cdot n_{3i}}{1000} \right)^{0,4} \\
T_0 = \sum_{i=1}^I \frac{L_{di} \cdot b}{S_{mi} \cdot K_1} \\
R_a = k \cdot V_{k(i=1)}^x \cdot V_{d(i=1)}^y \cdot t_{(i=1)}^2
\end{array} \right. \quad (128)$$

С учетом характерных отличий рассматриваемого метода обработки, кинематических особенностей и технических возможностей применяемого оборудования становится возможность решения задачи установления предельно допустимых значений режимов обработки, обеспечивающих стабильное протекание процесса обработки в пространстве всей рабочей зоны операций проходного бесцентрового шлифования.

Выводы по главе 2

Материалы, представленные в главе теоретических исследований, позволяют сделать заключение о получении следующих научных результатов.

На основе сформированной структурированной базы данных способов бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим возможностям и компоновочным схемам используемого оборудования и средств технического оснащения выполнена последовательная кластеризация, и сформированы группы способов проходного бесцентрового шлифования, объединенных по критерию однородности проектных процедур при выполнении их технологической подготовки.

Решена задача разработки формализованных моделей определения пространственного расположения мест контактов обрабатываемой поверхности с ведущим, шлифовальным кругами и опорной поверхностью ножа с учетом размерных характеристик элементов технологической системы, и их взаимосвязями в сечениях рабочей зоны.

Выведены зависимости, устанавливающие изменение величины припуска и представлена методика выполнения процедуры оценки соответствия условию силового замыкания в различных секторах рабочей зоны обработки при проходном бесцентровом шлифовании.

Основываясь на моделях, позволяющих устанавливать пространственное расположение мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы [53] на операциях проходного бесцентрового шлифования, выполнена разработка поэлементного расчета составляющих сил, возникающих в процессе реализации технологической операции. Представленные зависимости позволяют устанавливать направление и величины сил с учетом: реального состояния оборудования, средств технологического оснащения и наладочных параметров операции; размерных взаимосвязей обрабатываемой поверхности с технологической оснасткой и постоянно меняющихся мест контакта

в сечениях зоны обработки; материала, конфигурации, массы и габаритных характеристик детали и параметров обрабатываемой поверхности; материала опорного ножа; структуры шлифовального и ведущего кругов; технологические режимы обработки, включающие распределений величины снимаемого припуска в рамках перехода. Созданный методический подход и разработанные формализованные соотношения системы взаимосвязанных сил отражают особенности динамического характера операций проходного бесцентрового шлифования и выступают теоретической основой принятия объективных обоснованных решений при их технологической подготовке, обеспечивающих качество выполнения работ и повышение производительности.

Выполненные исследования открывают возможности для системного подхода к совершенствованию технологической подготовки операций продольного бесцентрового шлифования для наружных поверхностей типа тел вращения. Совокупность представленных моделей и методик составляет методическое обеспечение рациональной настройки оборудования для высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования

Глава 3. Методика проведения экспериментальной проверки, работоспособности моделей

3.1 Методика проведения эксперимента

Для проверки работоспособности представленных в диссертационной работе методик были выполнены экспериментальные исследования в рамках действующих производственных комплексов: АО «НПП Алмаз»; АО «ЕПК Саратов»; АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко».

Последовательность выполнения экспериментальных исследований включала в себя выбор обрабатываемых деталей и технологических операций, выполняемых на бесцентрово шлифовальном оборудовании. Все исследования проводились в рамках действующих предприятий при выполнении производственных заданий. При формировании исходных данных для расчета в соответствии с разработанными моделями наладочных параметров проводились измерительные процедуры для определения реальных размерных характеристик технологического оснащения выполняемых операций, выбор их характеристик принимался на основе технологической документации. По результатам обработки партий деталей с рекомендованными наладочными параметрами проводились контрольные измерения.

По результатам экспериментальных исследований при обработке деталей и полученной информации сделано заключение о работоспособности разработанных моделей и методик, что послужило основой для последующего применения имитационного подхода при изучении различных сечений во всей рабочей зоне станка.

Для достижения комплексной оценки выполненных исследований определялись взаимовлияющие факторы, связывающие назначение и методику настройки наладочных параметров на характеристики качества обрабатываемых поверхностей при проходном бесцентровом шлифовании. С целью визуализации

проведенных экспериментальных исследований построены графики результатов и представлены изображения наглядно подтверждающие изменения значений технологических параметров в отдельных сечениях рабочей зоны обработки.

3.2 Формирование данных по технологиям и используемому оборудованию при проведении экспериментальных исследований.

В состав технического оснащения производственных участков данных предприятий входят: бесцентрово шлифовальные станки MACHINE TOOLS CORP RC-18, Станкостроительный завод им. С.М. Кирова (3Д180, 3А130, 3В182), JAINNHER JHC – 125, SASL 200*500 А, SASL5/AD, SASL 125, SASL 200*500.

В качестве примера из проведенных экспериментов в работе представлены результаты экспериментальных исследований обработки: «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011, цеха №24 АО «ЕПК Саратов» (предварительная и окончательная обработка); «Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности», ПР-8 АО «ЕПК Саратов» (предварительная и чистовая обработка) [53].

В таблицах 3.1, 3.2 сведены исходные данные при предварительном и окончательном шлифовании наружной цилиндрической поверхности «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01. В качестве кругов при предварительной и окончательной обработке использовались: рабочий – 24А16 СТ1В (F 80-90 O R), размер 500*500*305, предел износа 435*500*305; ведущий - 24А16 СТ1В (F 80-90 O R), размер 315*500*203, предел износа 278*500*203 .

Таблица 3.1 – Исходные данные для обработки «Кольцо наружное» подшипника
6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011 (предварительная обработка)

Название детали	Оборудование	Содержание перехода	Технологическая оснастка (обозначение предприятия)	СОЖ	Требования к характеристикам качества	Метод и средства измерения (оценки)	Количество проходов
Кольцо наружное	Sasl 200*500	Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность предварительно	24813-А3 нож опорный	СОТС карбон-4 2%-4% вода остальное	Точность диаметрального размера	Д-313; 5ИГП; Установочная мера	5
			03-16979-В оправка рабочего абразивного круга		Непостоянство диаметра	Д-313М; 1ИГП	
			74696-Б планшайба		Непостоянство среднего диаметра		
			22921-В копирная линейка для рабочего круга		Перпендикулярность наружной поверхности относительно базового торца	Д-313М; 2ИГП	
			09-19348-В копирная линейка для ведущего круга		Гранность	Д-313М; Призма <60°; 1ИГП	
			Алмазный карандаш ГОСТ 607-80 (0,5 карат)		Шероховатость	Образцы шерох. поверхн. ГОСТ 9378-93	
			Ролик алмазный ГОСТ 16014-78 (1 карат)		Отсутствие прижогов И ВНИП.101-10	Травлением	

Таблица 3.2 – Исходные данные для обработки «Кольцо наружное» подшипника
6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011 (окончательная обработка)

Название детали	Оборудование	Содержание перехода	Технологическая оснастка (обозначение предприятия)	СОЖ	Требования к характеристикам качества	Метод и средства измерения (оценки)	Количество проходов
Кольцо наружное	Sasl 200*500	Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность окончательно	24813-А3 нож опорный	СОТС карбон-4 2%-4% Вода остальное	Наружный диаметр	Д-313; 5ИГП; Установочная мера	3
			03-16979-В оправка рабочего абразивного круга		Непостоянство диаметра	Д-313М; 1ИГП	
			74696-Б планшайба		Непостоянство среднего диаметра		
			22921-В копирная линейка для рабочего круга		Перпендикулярность наружной поверхности относительно базового торца	Д-313М; 2ИГП	
			09-19348-В копирная линейка для ведущего круга		Гранность	Д-313М; Призма <60°; 1ИГП	
			Алмазный карандаш ГОСТ 607-80 (0,5 карат)		Отклонение от круглости	Talyrond	
			Ролик алмазный ГОСТ 16014-78 (1 карат)		Шероховатость	Образцы шерох. поверхн. ГОСТ 9378-93	
					Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Травлением	

В таблицах 3.3, 3.4 сведены исходные данные при предварительном и окончательном шлифовании наружной цилиндрической поверхности «Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности». В качестве кругов при предварительной и чистовой обработке использовались: рабочий – 24А25 Т В, размер 500*500*305, предел износа 400*500*305; ведущий - 24А25 Т В, размер 300*500*203, предел износа 240*500*203.

Таблица 3.3 – Исходные данные для обработки «Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности» (предварительная обработка)

Название детали	Оборудование	Содержание перехода	Технологическая оснастка (обозначение предприятия)	СОЖ	Требования к характеристикам качества	Метод и средства измерения (оценки)	Количество проходов
Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени точности	Sasl 200*500	Шлифовать цилиндрическую поверхность роликов предварительно	Нож опорный 56148-12	Триэтаноламин 0,7%-1,0% Нитрит натрия 0,7%-1,0% Вода остальное	Диаметр	61-023; 2ИГП; концевая мера Н=27,15 (наборная)	1
			Щечка направляющая рабочего круга 88891-Б		Непостоянство диаметра	262М; 1ИГП	
			Щечка направляющая ведущего круга 88890-Б				
			Линейка копирная рабочего круга 26522-В		Конусообразность	61-023; 05ИГП	
			Линейка копирная ведущего круга 26523-В		Огранка	В-901; призма с углом 108°; 1ИГП	
			Карандаш 3908-0053 ГОСТ 607-80 (тип 01; 1,0 карат)		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Контрольный образец №60	

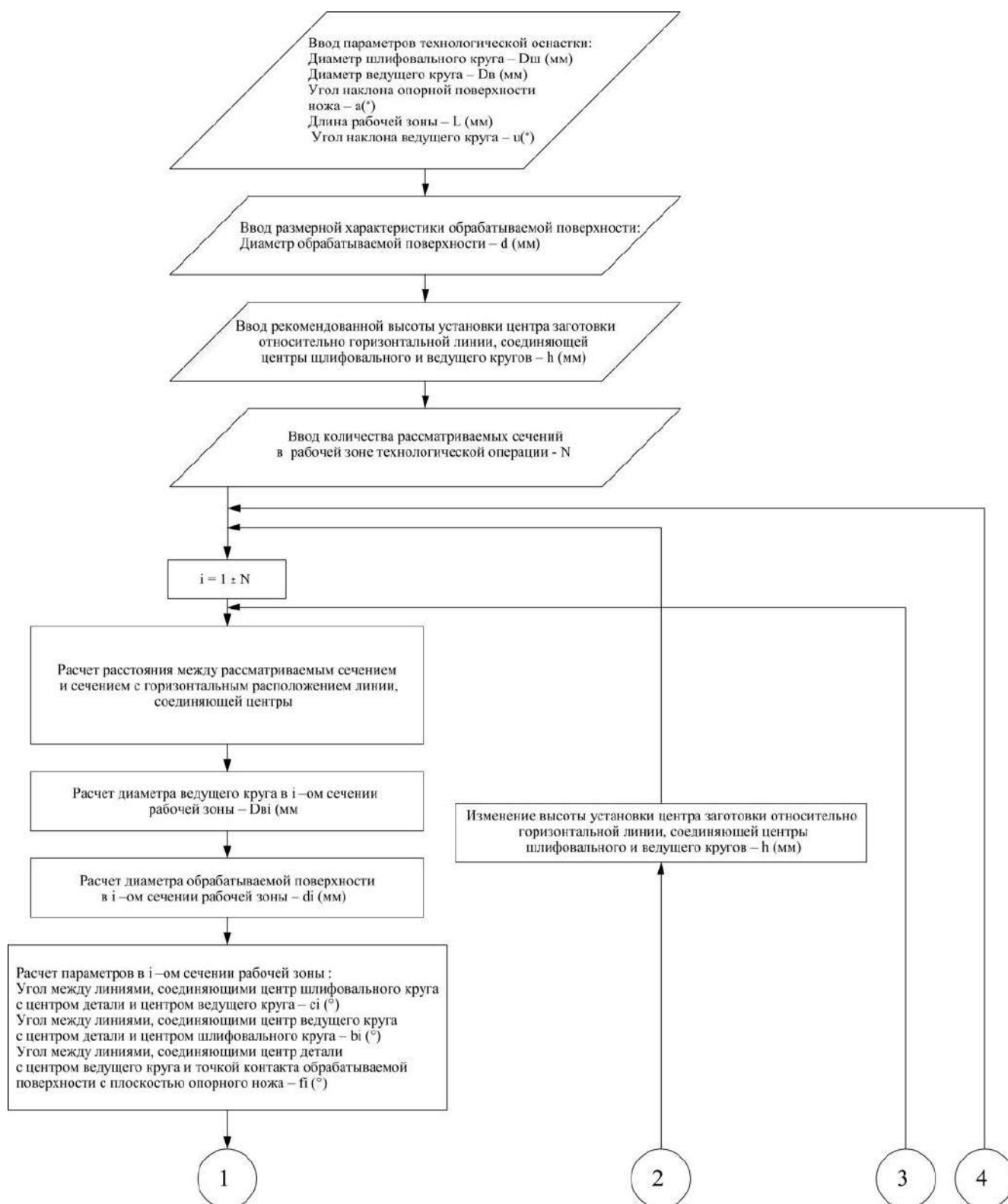
Таблица 3.4 – Исходные данные для обработки «Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности» (Чистовая обработка)

Название детали	Оборудование	Содержание перехода	Технологическая оснастка (обозначение предприятия)	СОЖ	Требования к характеристикам качества	Метод и средства измерения (оценки)	Количество проходов
Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени точности	Sasl 200*500	Шлифовать цилиндрическую поверхность роликов чисто	Нож опорный 56148-12	Триэтаноламин 0,7%-1,0% Нитрит натрия 0,7%-1,0% Вода остальное	Диаметр	61-023; 2ИГП; концевая мера H=27,065 (наборная)	2
			Щетка направляющая рабочего круга 88891-Б		Непостоянство диаметра	262М; 05ИГП	
			Щетка направляющая ведущего круга 88890-Б		Конусообразность	61-023; 05ИГП	
			Линейка копирная рабочего круга 26522-В		Огранка	В-901; призма с углом 108°; 1ИГП	
			Линейка копирная ведущего круга 26523-В		Отклонение от круглости	Талиронд	
			Карандаш 3908-0053 ГОСТ 607-80 (тип 01; 1,0 карат)		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Контрольный образец №60	

3.3. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения действий по расчету параметров в сечениях рабочей зоны

При проведении экспериментальных исследований были использованы разработанные программные средства, позволяющие автоматизировать созданные модели по определению рациональных параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования. Из общего количества программных средств представлены описания алгоритмов для выполнения проектных процедур по расчету параметров в сечениях рабочей зоны, величин припусков, выполнения условия силового замыкания.

Для определения пространственного расположения точек контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы разработана блок-схема (рисунок 3.1), которая описывает последовательность действий по расчету параметров в сечениях рабочей зоны операций проходного бесцентрового шлифования [53].



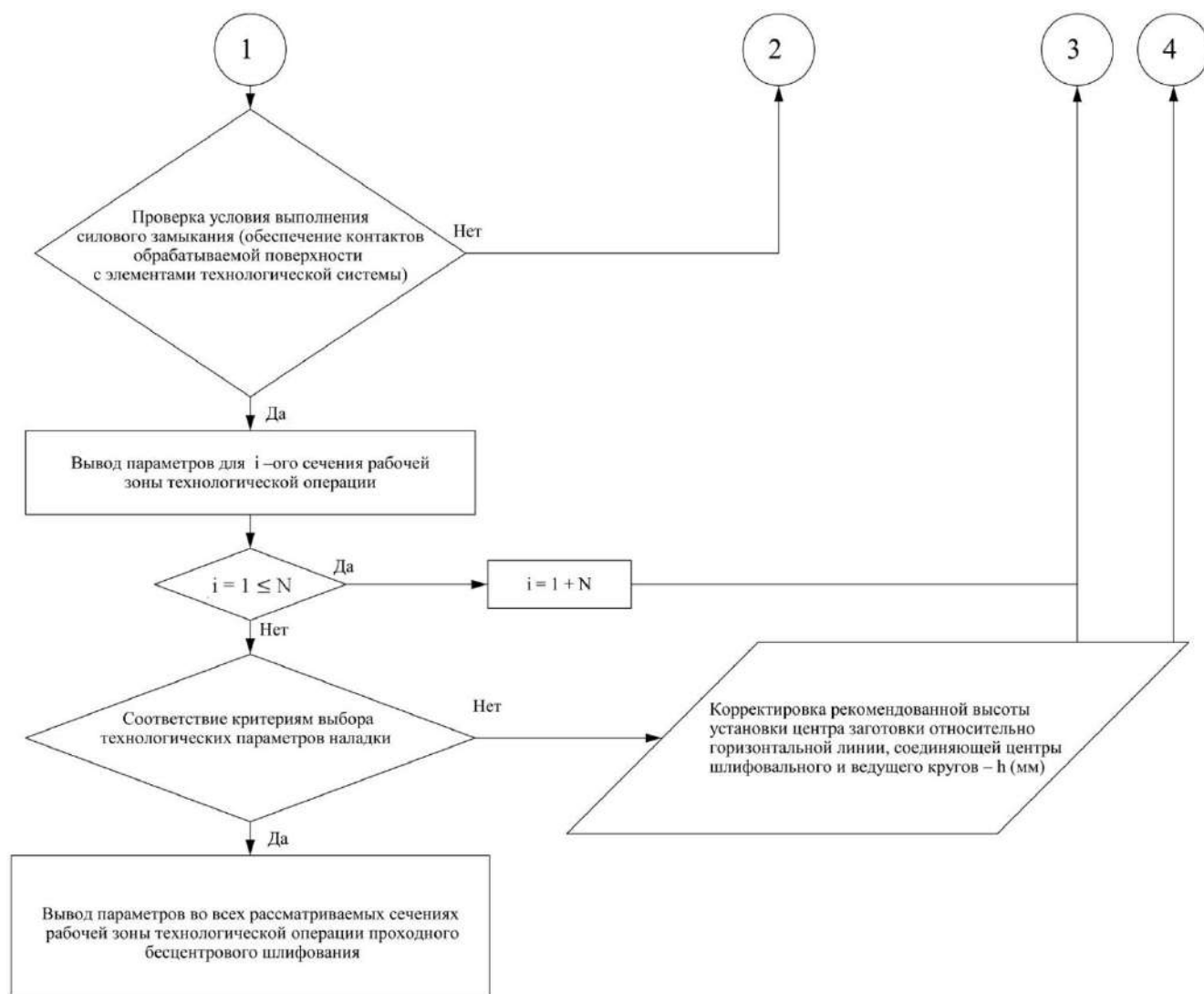


Рисунок 3.1 – Блок схема расчета параметров в сечениях рабочей зоны операций проходного бесцентрового шлифования

В качестве исходной информации, описывающей реальное состояние технологической системы, вводятся: действительные диаметры шлифовального и ведущего кругов в сечении при расположении центров шлифовального и ведущего кругов на одной горизонтальной линии, угол наклона опорной поверхности установочного ножа, длина рабочей зоны, угол наклона ведущего круга. Представленная информация является неизменяемой для расчета наладочных параметров выполнения технологической операции в конкретных условиях.

В соответствии с разработанными рекомендациями [89, 90, 91] выбирается первоначальное значение высоты установления центра обрабатываемой

поверхности относительно горизонтальной линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов [53].

На основе особенностей проектируемой технологической операции и степени требуемой детализации решаемых задач устанавливается количество сечений в рабочей зоне технологической операции, для которых будут проводиться расчеты, и организуется цикловая стратегия выполнения расчетных процедур [53].

В каждом цикле определяется: расстояния между рассматриваемым сечением и сечением с горизонтальным расположением линии, соединяющей центры шлифовального и ведущего кругов; диаметра ведущего круга в i -ом сечении рабочей зоны, с использованием методики [83,84,85]; среднего диаметра обрабатываемой поверхности в i -ом сечении рабочей зоны. Последовательно с применением разработанных зависимостей (раздел) рассчитываются параметры в i -ом сечении рабочей зоны: угол между линиями, соединяющими центр шлифовального круга с центром детали и центром ведущего круга; угол между линиями, соединяющими центр ведущего круга с центром детали и центром шлифовального круга; угол между линиями, соединяющими центр детали с центром ведущего круга и точкой контакта обрабатываемой поверхности с плоскостью опорного ножа; расстоянием между центрами шлифовального и ведущего кругов в i -ом сечении рабочей зоны [53].

На следующем этапе схемы на основе рассчитанных значений пространственных параметров проводится проверка с позиции выполнения условия силового замыкания в i -ом сечении рабочей зоны, в части обеспечения контактов обрабатываемой поверхности во всех трех точках с элементами технологической системы [49]. При его невыполнении необходимо внесение изменений при выборе рекомендованных значений высот, предлагаемых в научной литературе.

При выполнении условия обеспечения контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы во всех рассматриваемых

сечениях рабочей зоны рассчитанные параметры используются при проведении дальнейшего проектирования технологической операции [62].

Последующие действия в соответствии с блок-схемой связаны с возможностью проведения анализа нескольких вариантов по расчету параметров мест пространственного расположения точек контактов [62] обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, которые отличаются значениями выбранных рекомендованных высот. Это позволяет расширить многовариантность принятия решений и осуществить на следующих этапах проектирования технологических операций выбор рациональных решений.

3.4. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения действий по расчету величины припуска

В процессе исследования установлены причинно-следственные зависимости, которые определяют, как величина припуска влияет на динамические характеристики процесса обработки в различных зонах рабочей области при выполнении конкретного вида обработки.

На основе этих зависимостей разработаны методические, алгоритмические и программные инструменты для определения припуска как части технологической подготовки операции (рисунок 3.2) [49].

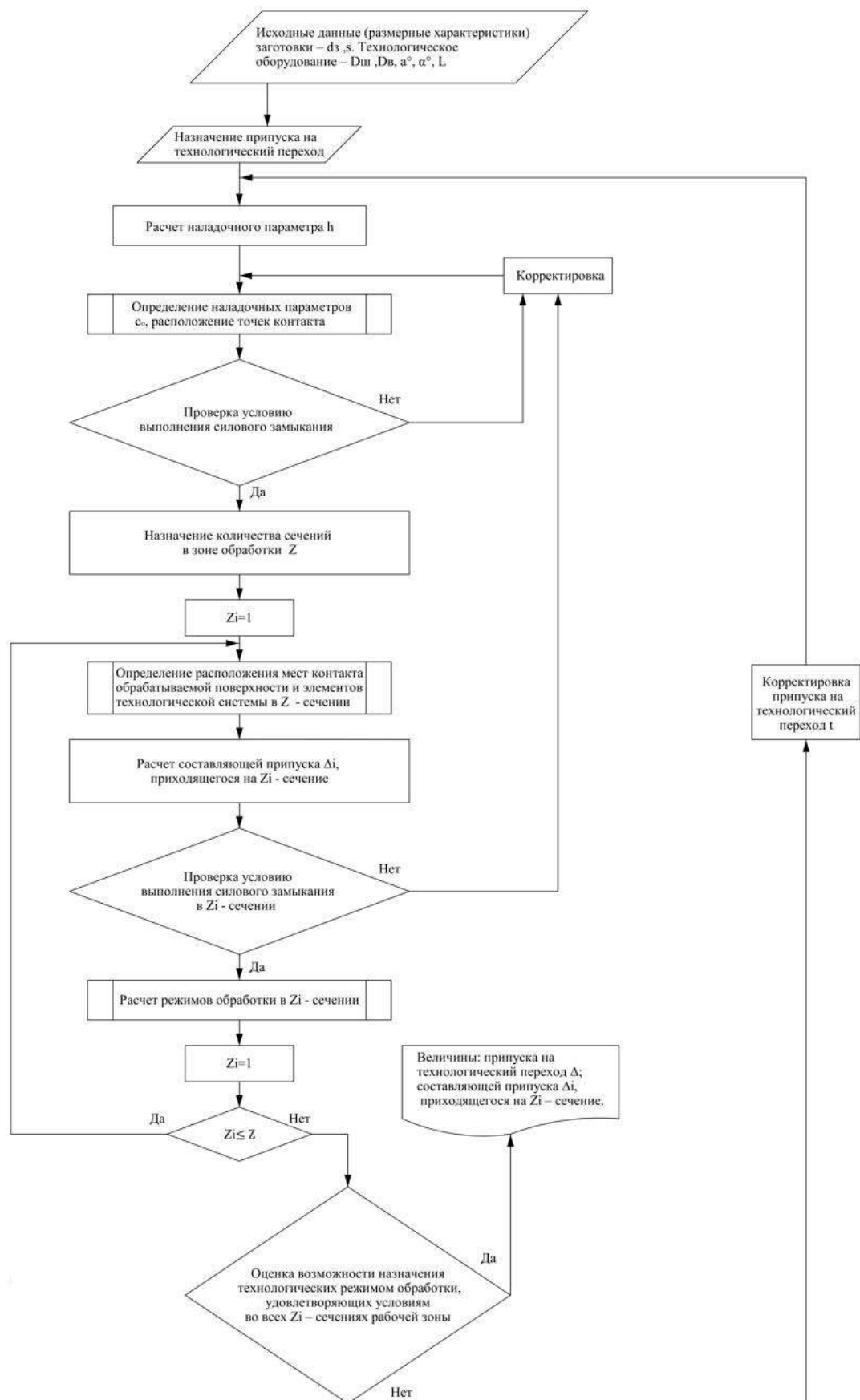


Рисунок 3.2 – Блок-схема расчета составляющих припуска в рабочей зоне обработки

Итеративный подход к созданию модели позволил генерировать различные варианты настроек с учётом фактического состояния оборудования и инструментов, а также взаимного расположения обрабатываемой детали и компонентов системы на протяжении всего процесса обработки [49].

3.5. Разработка алгоритма и программного обеспечения процедуры выполнения условия силового замыкания

Разработанная последовательность проектных действий для определения соответствия параметров при настройке оборудования для бесцентрового шлифования, учитывающая соблюдения условия выполнения силового замыкания представлена в виде блок-схемы на рисунке 3.3.

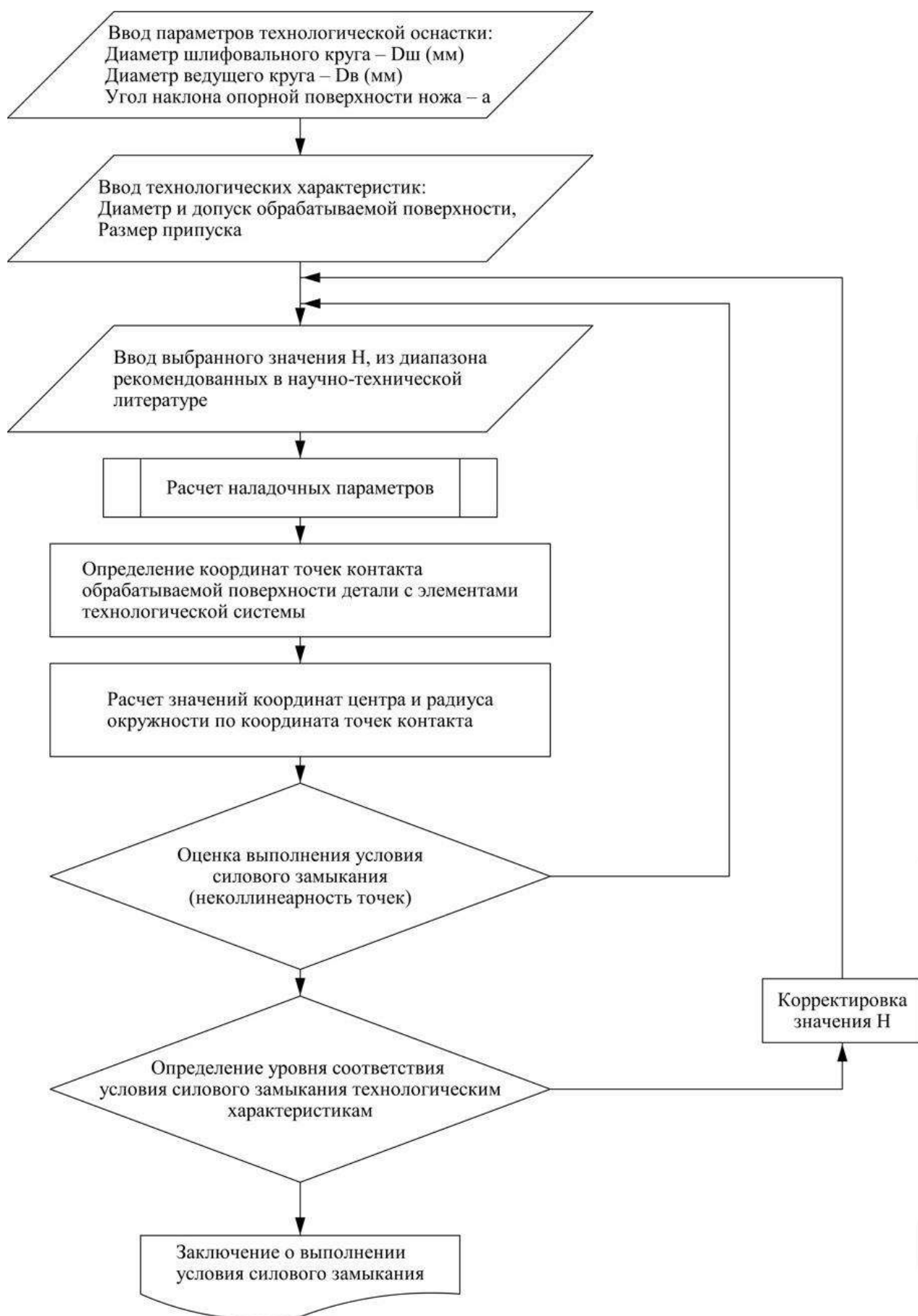


Рисунок 3.3 – Блок схема проверки выполнения условия силового замыкания

Ввод исходных данных включает в себя три группы информации: реальные размеры технологического оборудования; данные из технологической документации; значение высоты центра обрабатываемой поверхности (H), которое можно рассчитать или выбрать из справочных материалов.

Далее следует выполнение следующих шагов: расчет параметров настройки на основе реального состояния технологического оборудования; определение координат точек контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, используя центр заготовки в качестве координат; расчет значения координат центра и радиуса окружности по координатам трёх точек с помощью известной автоматизированной подсистемы.

Далее проводится проверка выполнения условия силового замыкания, заключающаяся в требовании неколлинеарности рассматриваемых точек и соответствии технологическим характеристикам перехода [47].

Алгоритм позволяет анализировать различные результаты расчётов параметров наладки и выбирать наиболее подходящие с точки зрения соответствия условию силового замыкания. Результаты исследований подтверждают необходимость использования силового замыкания в качестве ключевого показателя качества работ по наладке операций бесцентрового шлифования. Выполнение представленных экспериментальных исследований позволяет проводить анализ соответствия этого требования с учётом текущего состояния технологической системы [49].

Выводы по главе 3

В главе описана последовательность проведения промышленных экспериментальных работ, представлены структура и состав сформированных исходных данных по используемому оборудованию и технологиям позволяющих провести проверку работоспособности выполненных теоретических исследований.

На основе теоретических положений главы 2 разработаны и представлены алгоритмы и программные процедуры: по расчету технологических параметров в сечения рабочей зоны на операциях проходного бесцентрового шлифования; расчета составляющих величины припуска; определения соответствия требования условию силового замыкания, обеспечивающих на ряду с другими созданными средствами автоматизации проектных процедур сокращения трудоемкости наладок и обеспечения стабильности параметров качества обрабатываемых деталей.

Выполненные исследования позволили перейти к практической реализации результатов работ для проверки в условиях действующих производственных систем, использующих оборудование проходного бесцентрового шлифования.

Глава 4. Экспериментальные исследования по оценке работоспособности созданных процедур наладки операций проходного бесцентрового шлифования

4.1. Результаты выполнения проектных процедур определения рациональных наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования

С использованием разработанных методических материалов, алгоритмического и программного обеспечения проведены промышленные экспериментальные исследования на трех действующих предприятиях: АО «НПП Алмаз», АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко», АО «ЕПК Саратов». В качестве примеров приведения результатов проведенных испытаний представлены экспериментальные данные, полученные на предприятии подшипниковой промышленности, что вызвано широким применением метода проходного бесцентрового шлифования в удельном весе бесцентровой обработки в технологиях изготовления продукции. Результаты экспериментальных расчетных значений, полученных на основе реальных данных в производственных условиях (раздел 3.2).

В качестве примера проверки методики по наладке станков с проходным бесцентровым шлифованием представлены исследования для наружной поверхности «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011 (предварительная обработка) (угол наклона опорной поверхности ножа 25° , угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости 3°). Для обеспечения заданного в технологической документации параметра высоты установки центров заготовки относительно линии центров кругов выполнен расчет в качестве наладочного размера расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов, регулируемое с помощью органов управления станком. При наладке учитывались реальные размеры шлифовального и ведущего кругов [63]. Полученные данные

позволили получить объективную оценку качества выполнения наладочных работ, представлены графики результатов расчётов, которые подтверждают динамический характер изменения составляющих параметров и возможность их учёта. Влияние реальных размерных характеристик шлифовального и ведущего кругов, а также действительного размера заготовки обрабатываемой поверхности на установление расчётных наладочных параметров представлено на рисунках 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 [49].

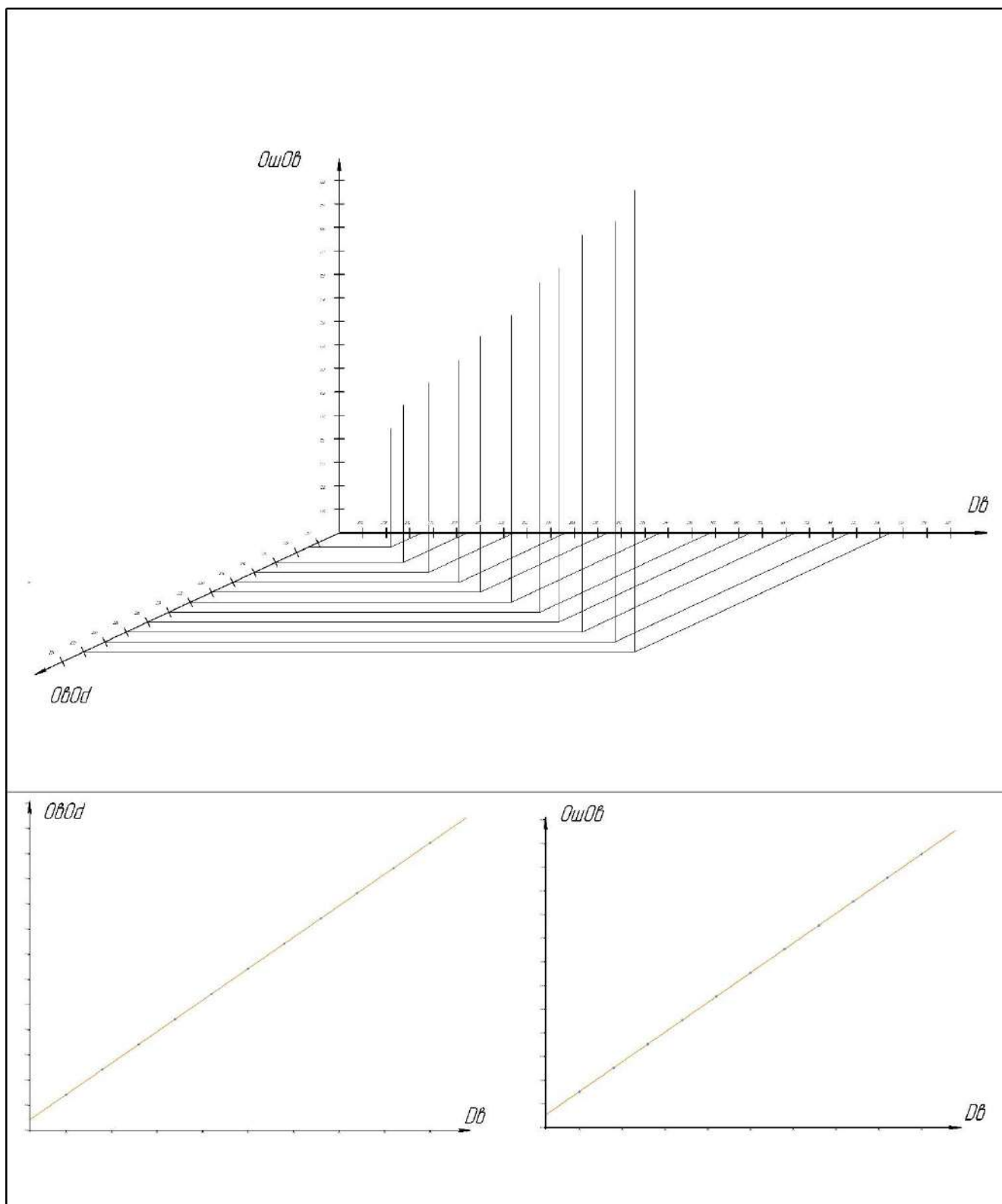


Рисунок 4.1 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между $O_{вОд}$, $O_{шОв}$ и изменением $D_{в}$

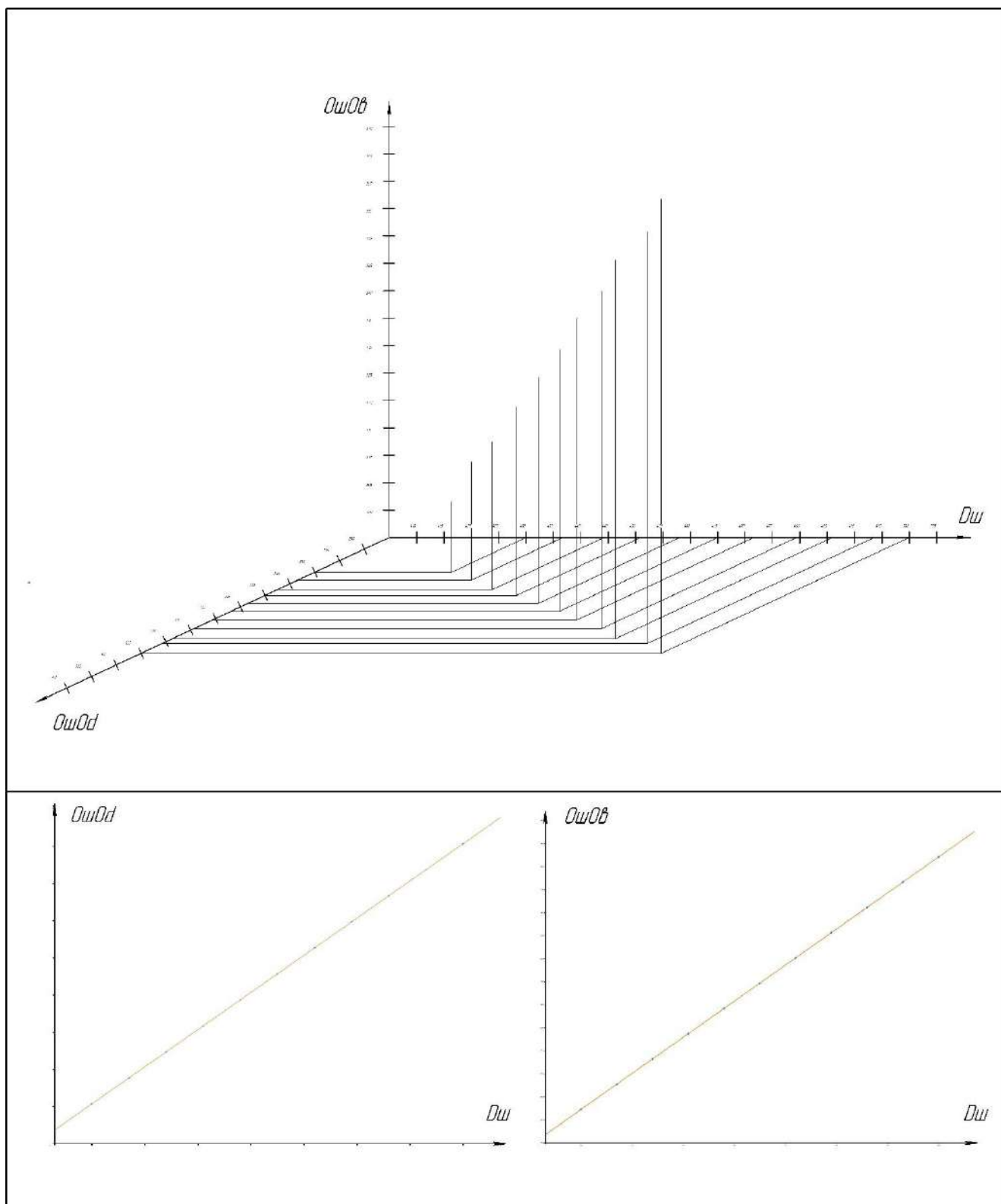


Рисунок 4.2 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между $O_{\text{ш}O_{\text{д}}}$, $O_{\text{ш}O_{\text{в}}}$ и изменением $D_{\text{ш}}$

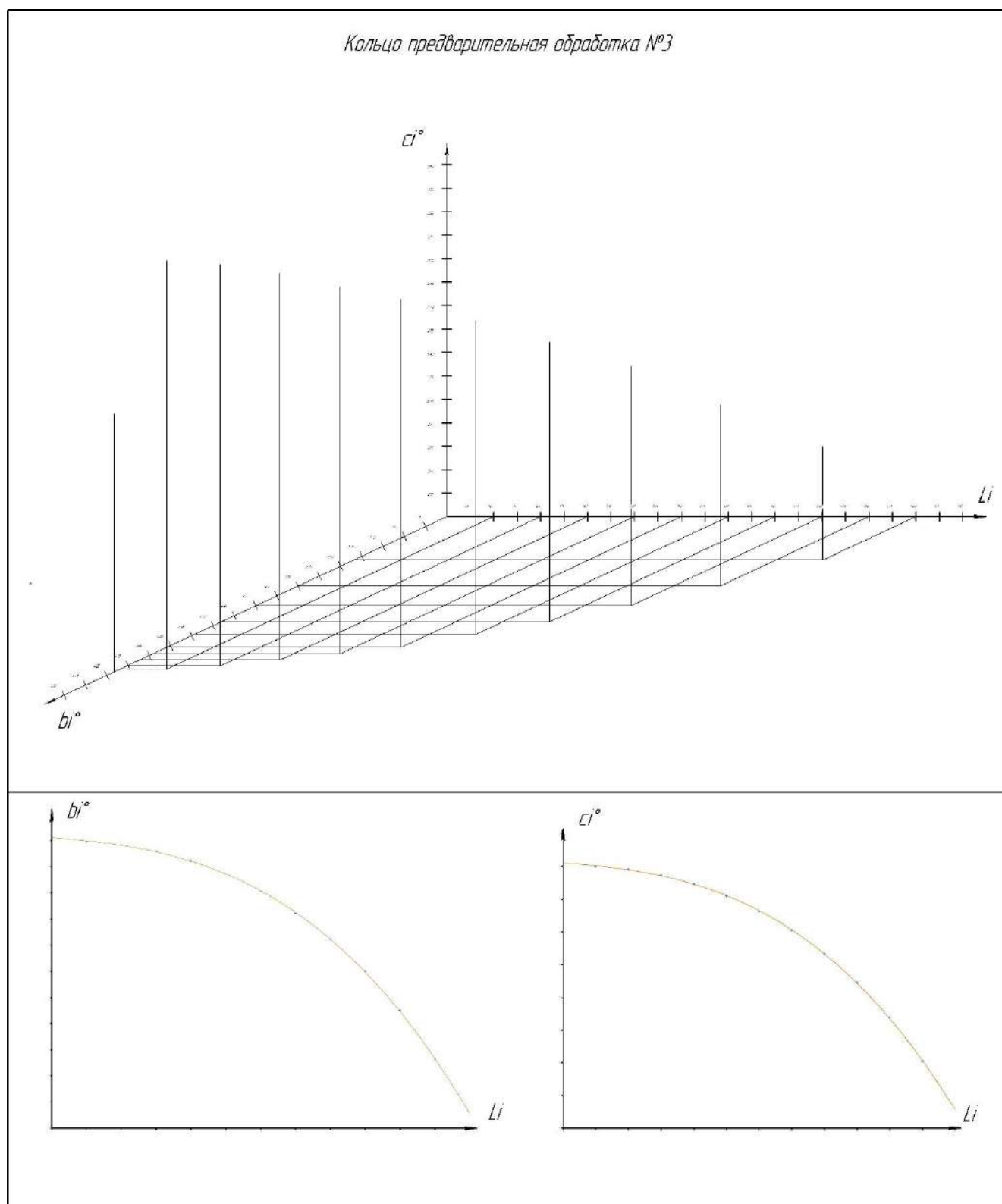


Рисунок 4.3 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между ci° , bi° и изменением Li

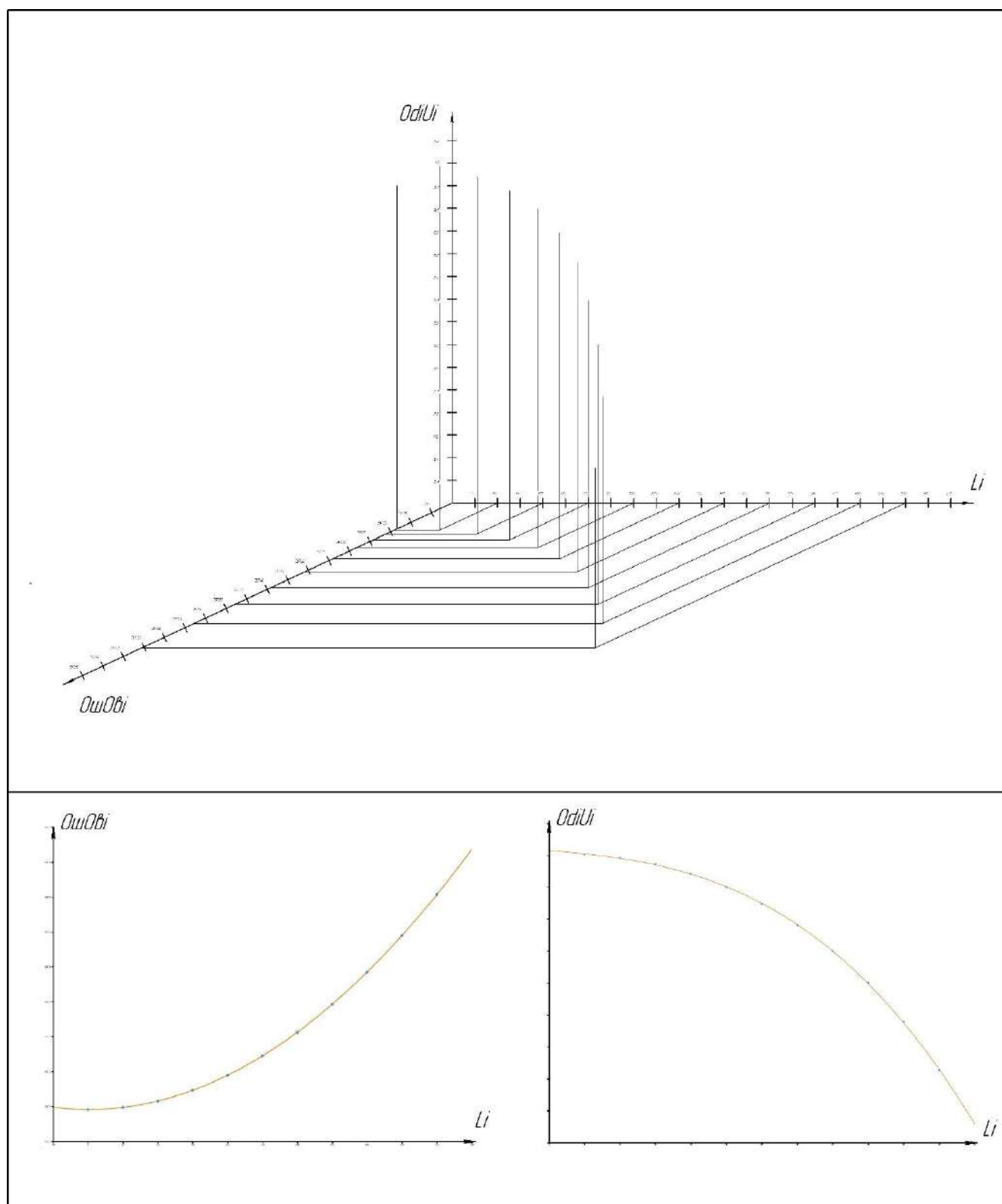


Рисунок 4.4 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшOвi$, $OdiUi$ и изменением Li

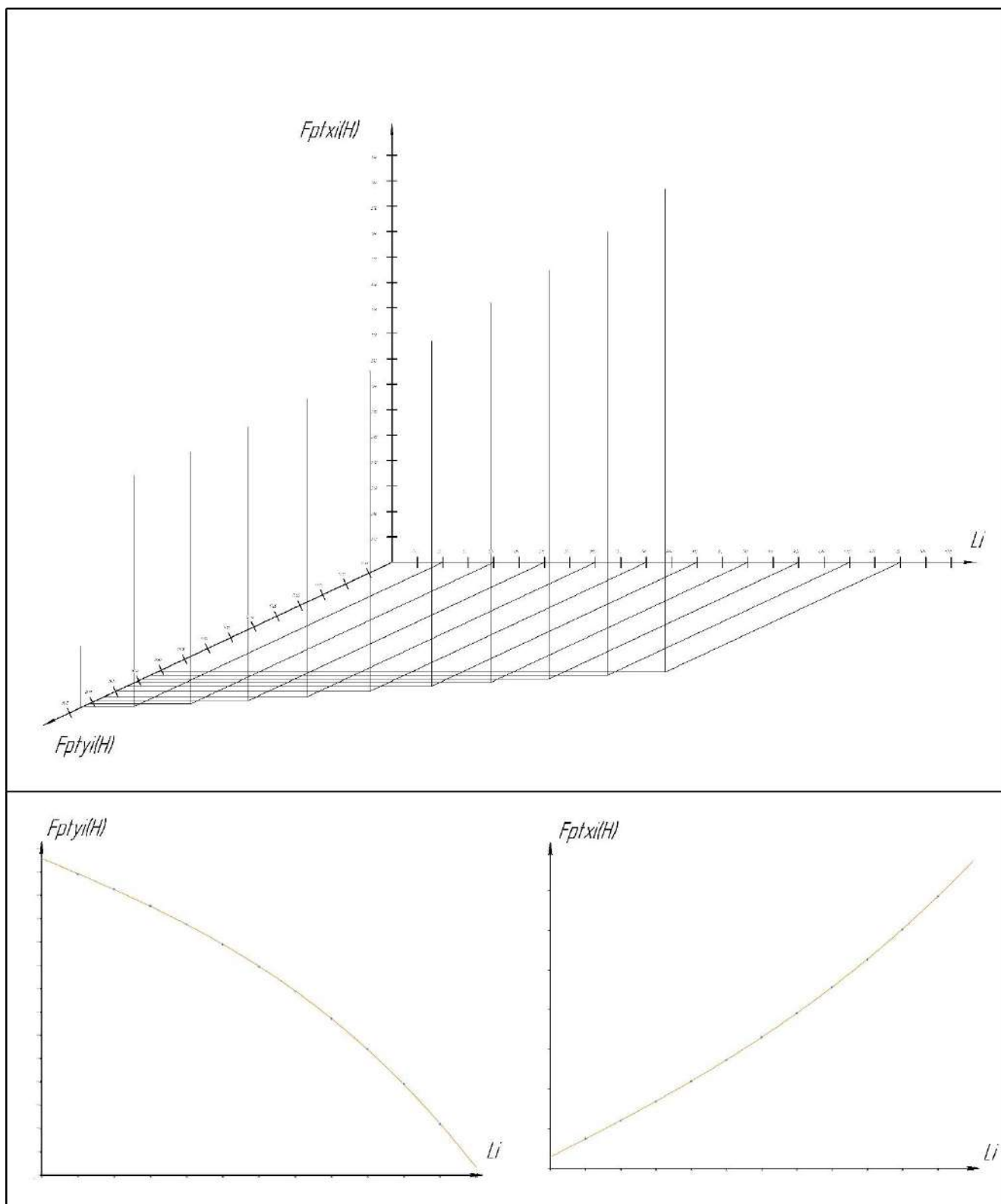


Рисунок 4.5 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между $F_{ptyi}(H)$, $F_{ptxi}(H)$ и изменением Li

При проведении эксперимента по результатам обработки деталей с рекомендованными наладочными параметрами проводился контроль по следующим характеристикам показателей качества (Таблица 4.1), который показал соответствие заданным технологическим параметрам.

Таблица 4.1 – Параметры качества обработки

Название детали	Содержание перехода	Требования к характеристикам качества	Технические требования
Кольцо наружное	Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность предварительно	Наружный диаметр	150,15+0,05 мм
		Непостоянство диаметра	0,014 мм
		Непостоянство среднего диаметра	0,014 мм
		Перпендикулярность наружной поверхности относительно базового торца	0,023 мм
		Гранность	0,014 мм
		Шероховатость	Ra 1,25 мкм
		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Прижоги отсутствуют

Аналогично предварительной обработке «Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011 для других объектов экспериментальных исследований учитывались изменения диаметров шлифовальных и ведущих кругов, угла наклона опорной поверхности ножа, угла наклона ведущего круга в вертикальной плоскости и размеров рабочей зоны обработки [49,53].

«Кольцо наружное» подшипника 6-170314Ш1.01 ГОСТ 520-2011 (окончательная обработка) – Рисунки 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10; Таблица 4.2.

«Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности» (предварительная обработка) - Рисунки 4.11, 4.12, 4.13, 4.14, 4.15; Таблица 4.3.

«Ролик прямолинейный с радиусными скосами, II степени сложности» (чистовая обработка) - Рисунки 4.16, 4.17, 4.18, 4.19, 4.20; Таблица 4.4.

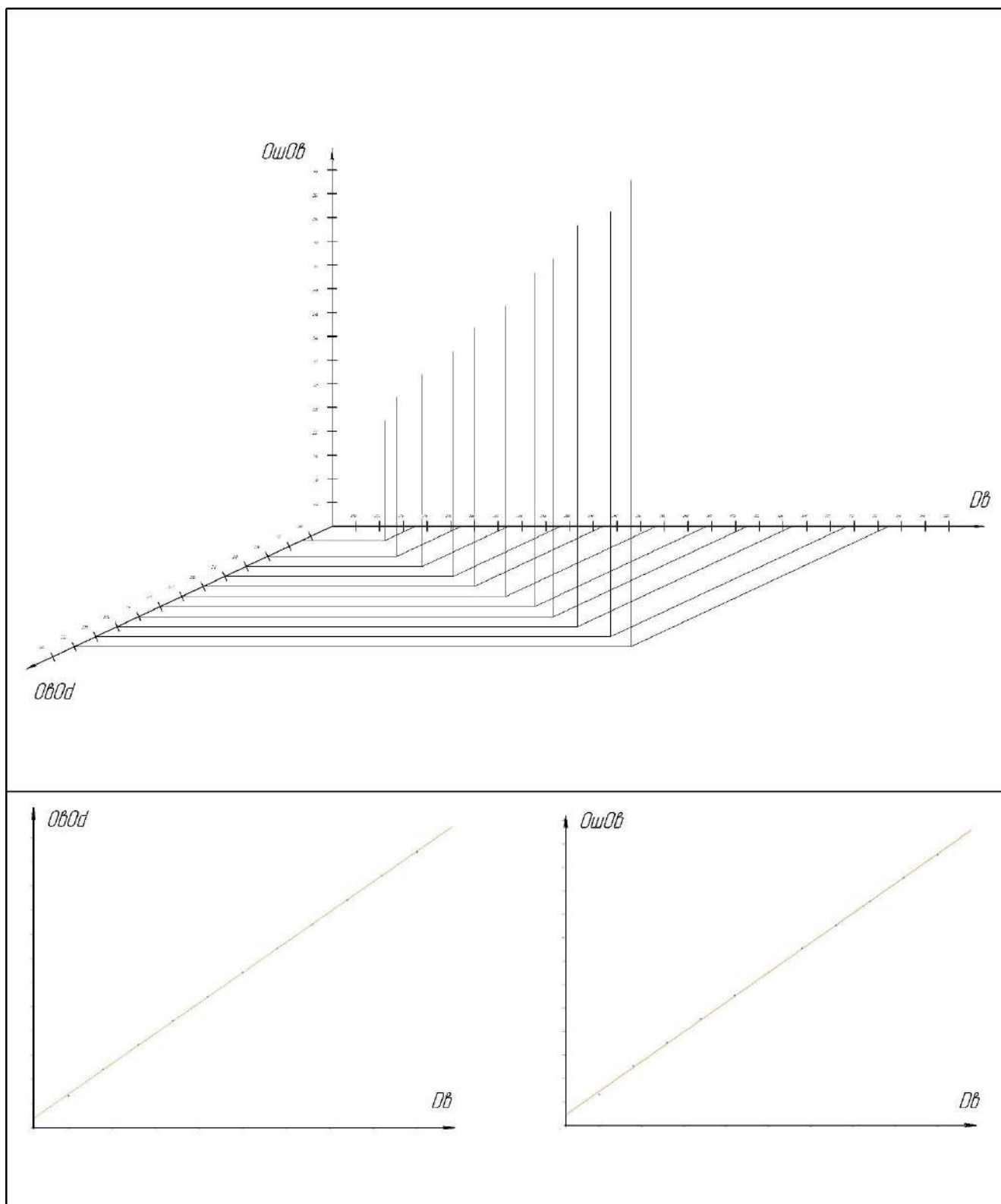


Рисунок 4.6 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OvOd$, $OshOv$ и изменением Dv

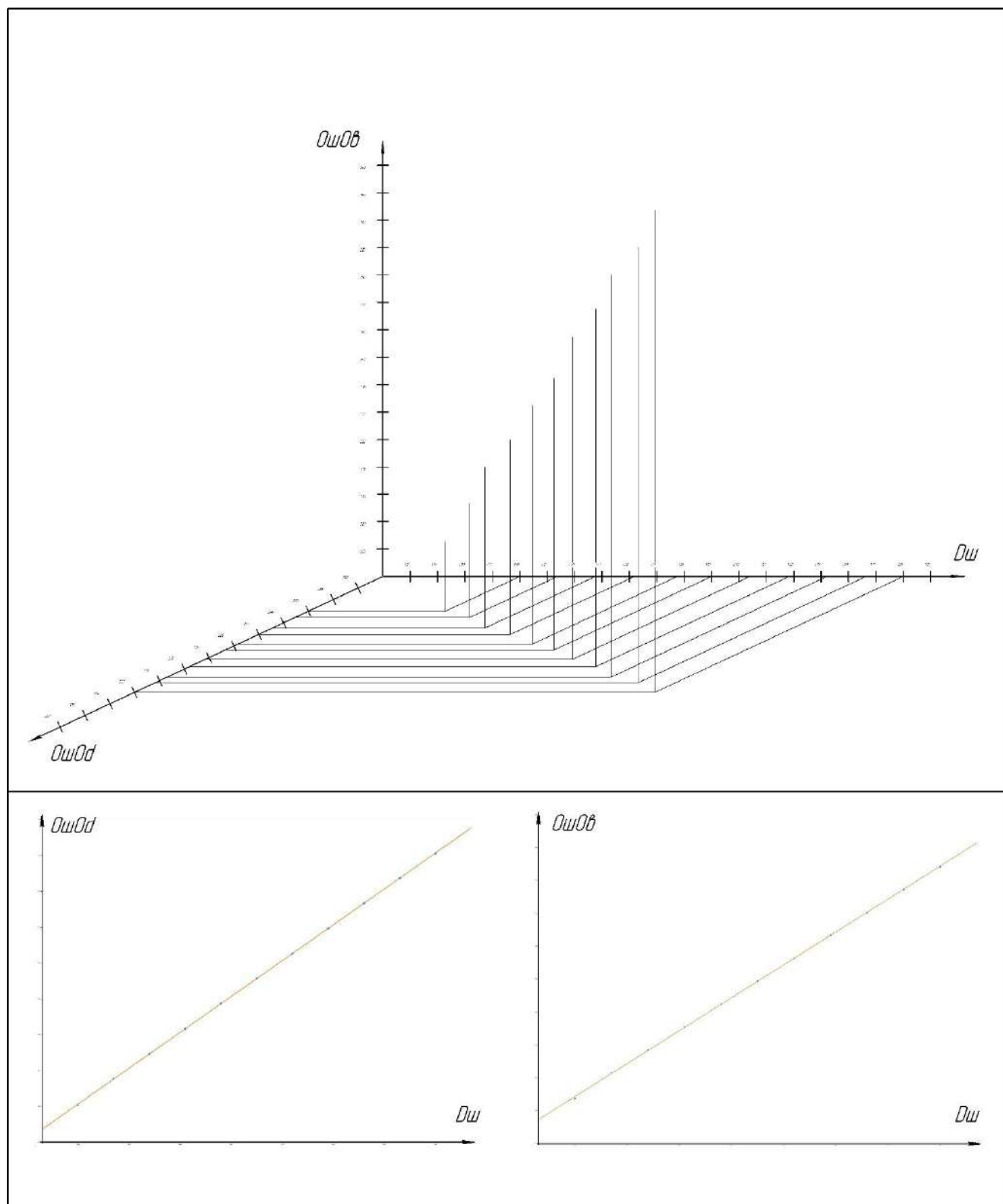


Рисунок 4.7 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшОд$, $OшОв$ и изменением $Dш$.

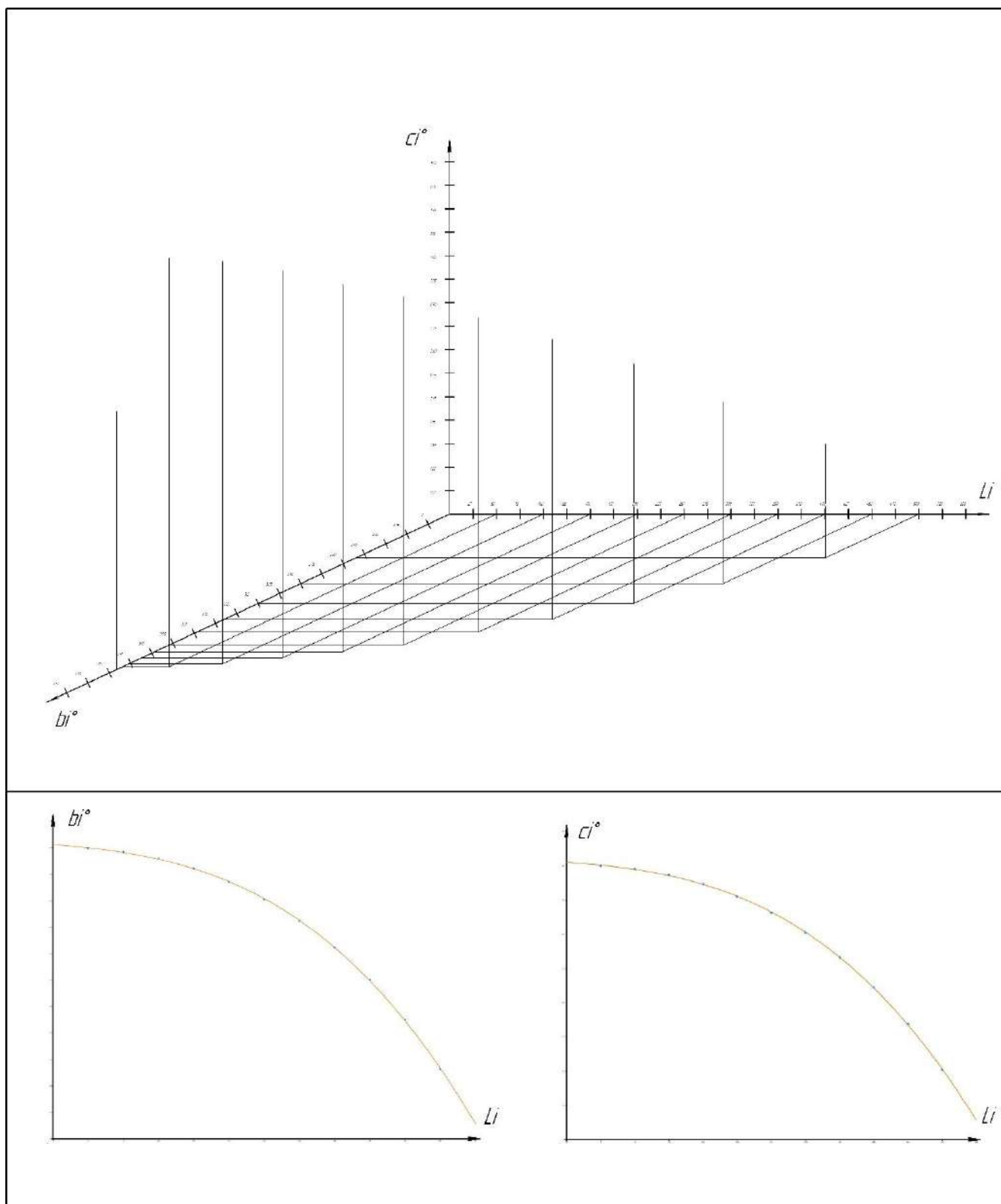


Рисунок 4.8 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между ci° , bi° и изменением Li .

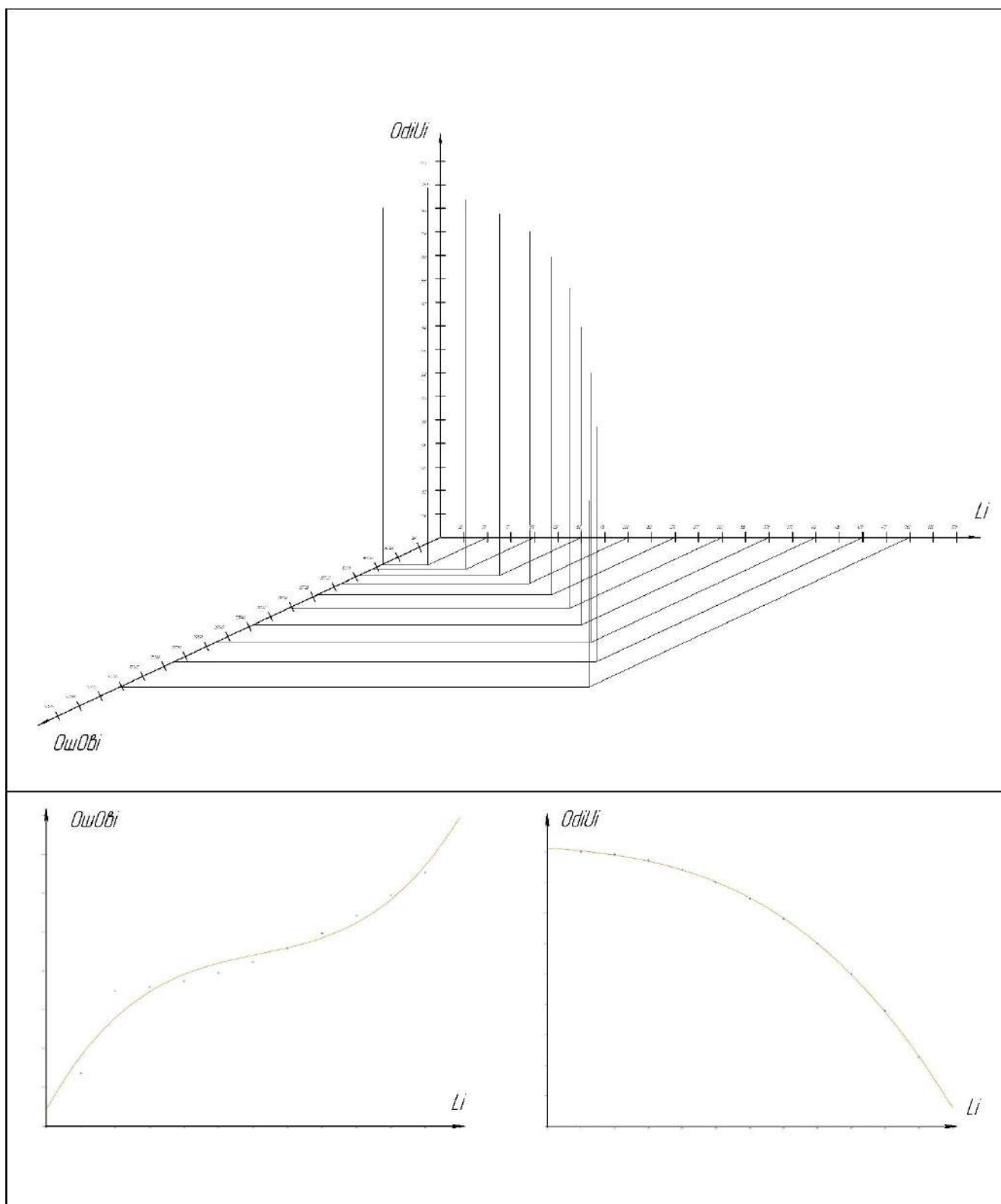


Рисунок 4.9 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшОвi$, $OдиUi$ и изменением Li .

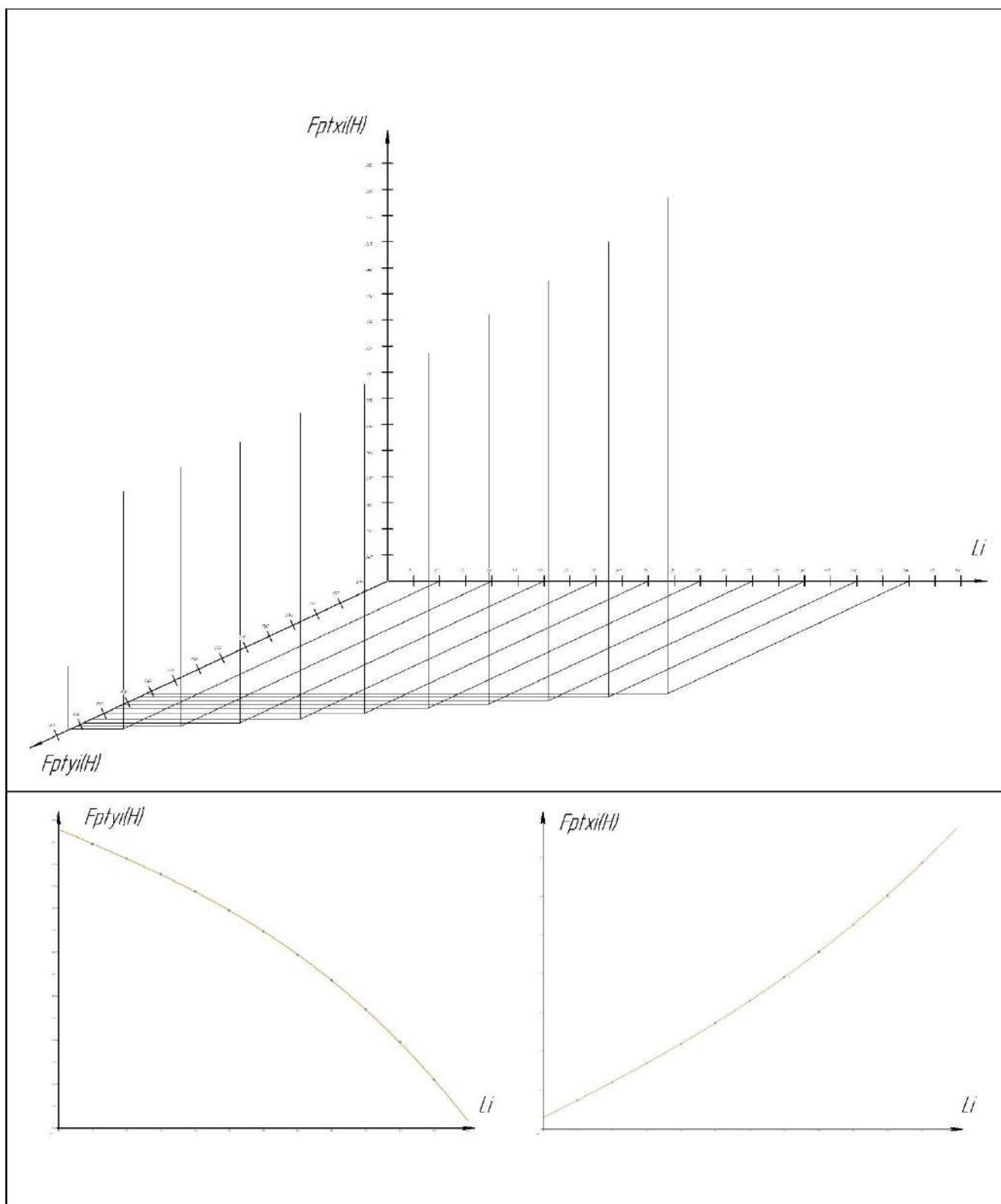


Рисунок 4.10 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $F_{ptyi}(H)$, $F_{ptxi}(H)$ и изменением Li .

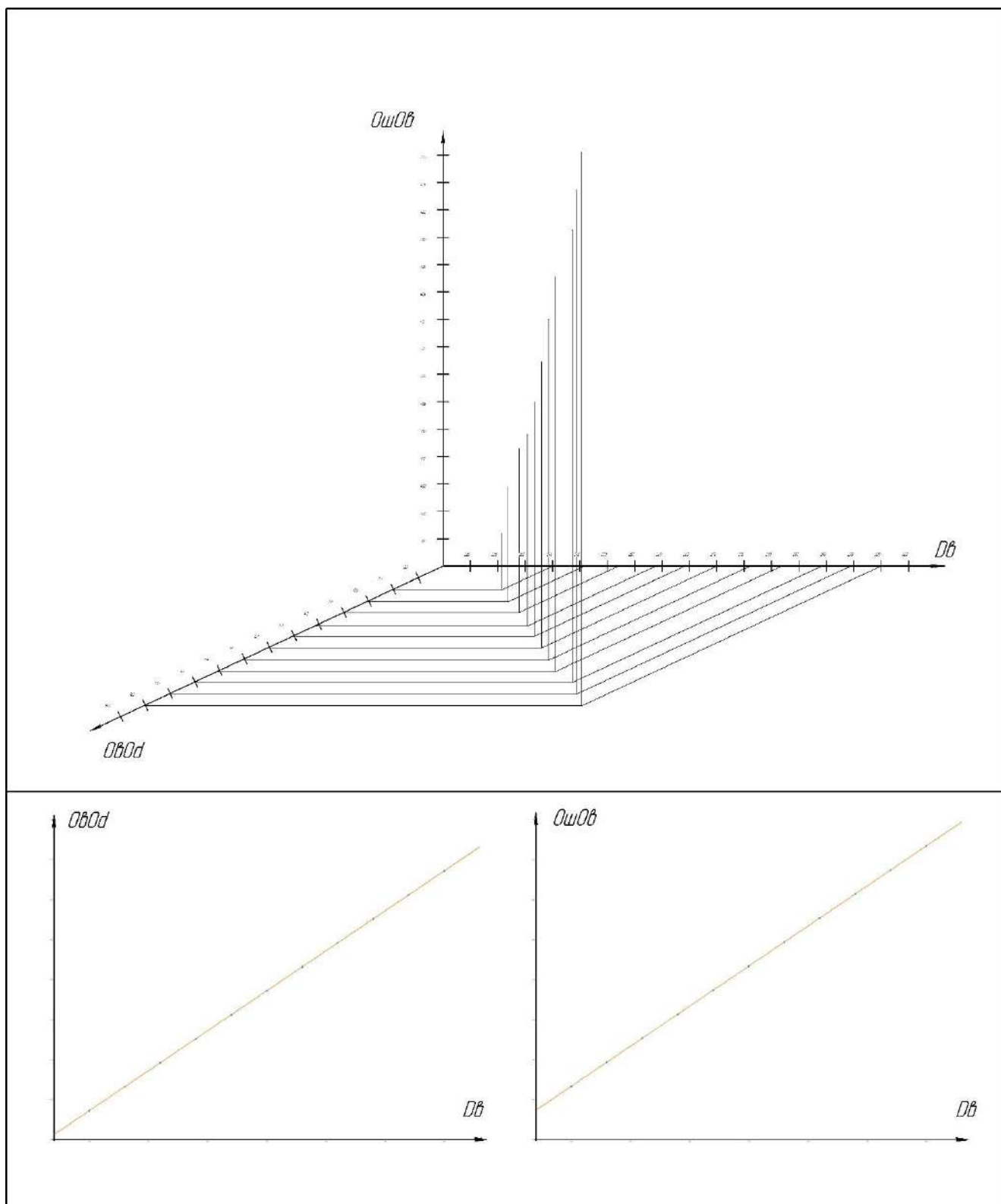


Рисунок 4.11 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между ОвОд, ОшОв и изменением Дв.

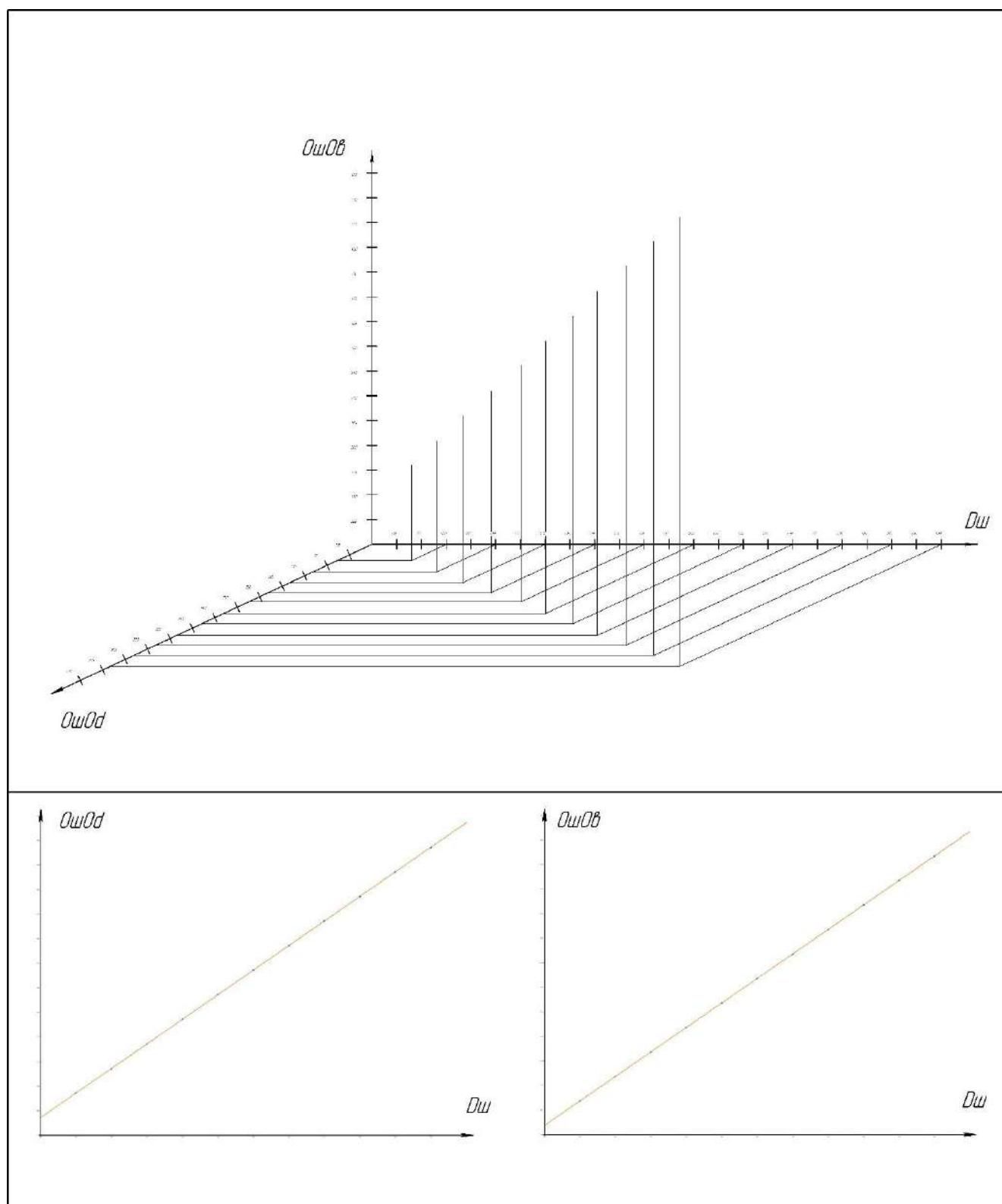


Рисунок 4.12 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшОд$, $OшОв$ и изменением $Dш$.

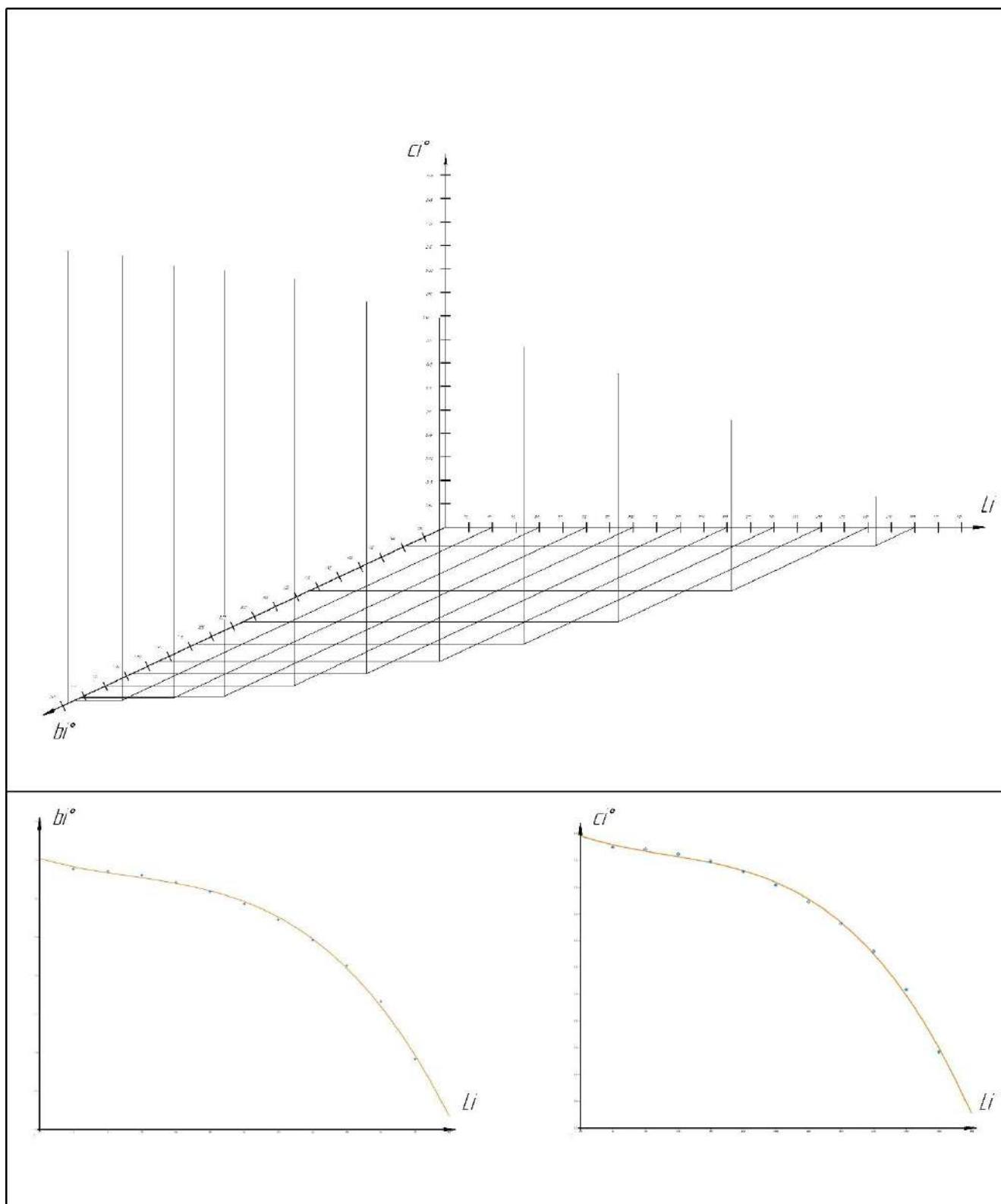


Рисунок 4.13 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между ci , bi° и изменением Li .

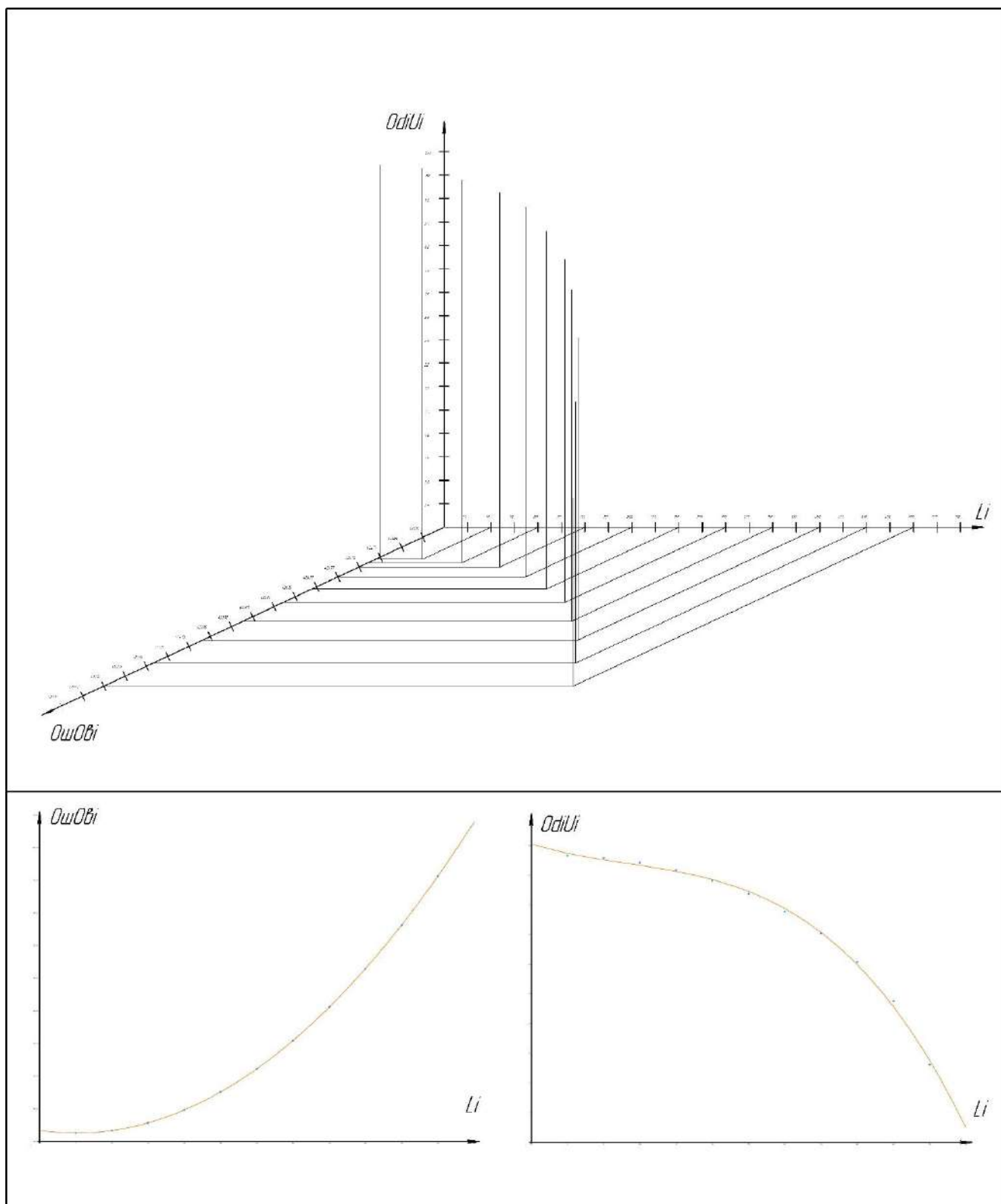


Рисунок 4.14 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между $OшOвi$, $OdiUi$ и изменением Li .

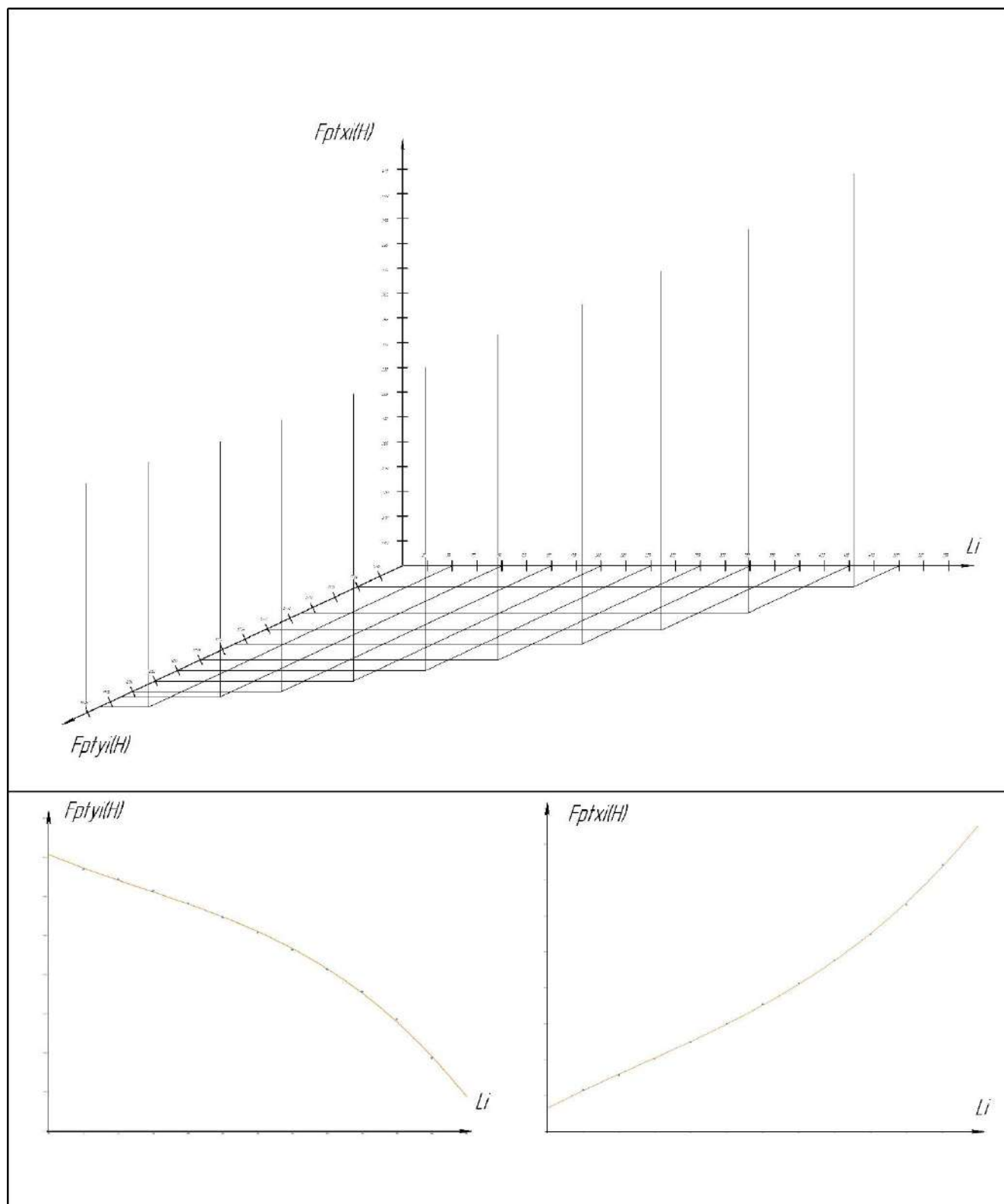


Рисунок 4.15 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $F_{ptyi}(H)$, $F_{ptxi}(H)$ и изменением Li .

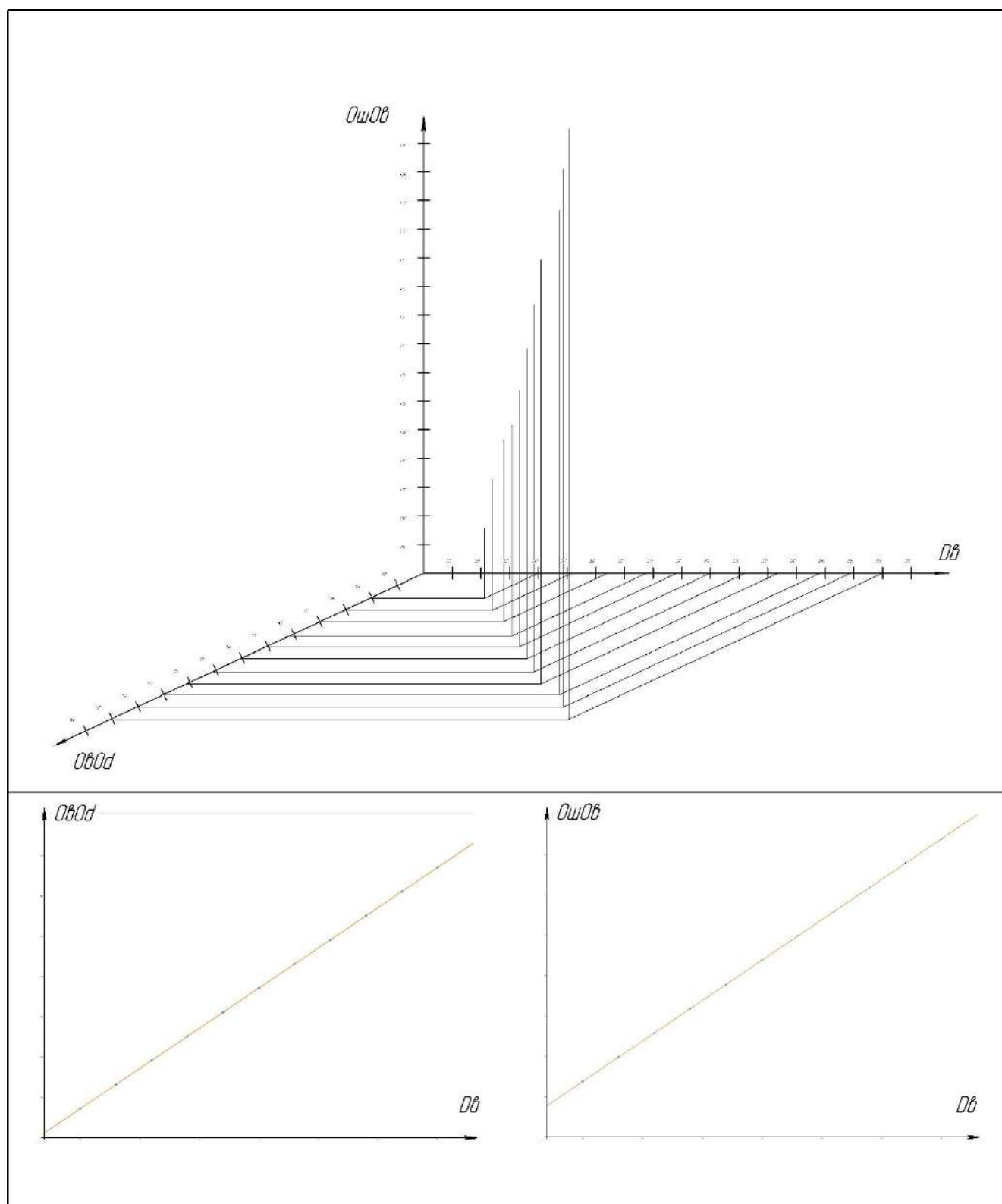


Рисунок 4.16 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между ОвОд, ОшОв и изменением Дв.

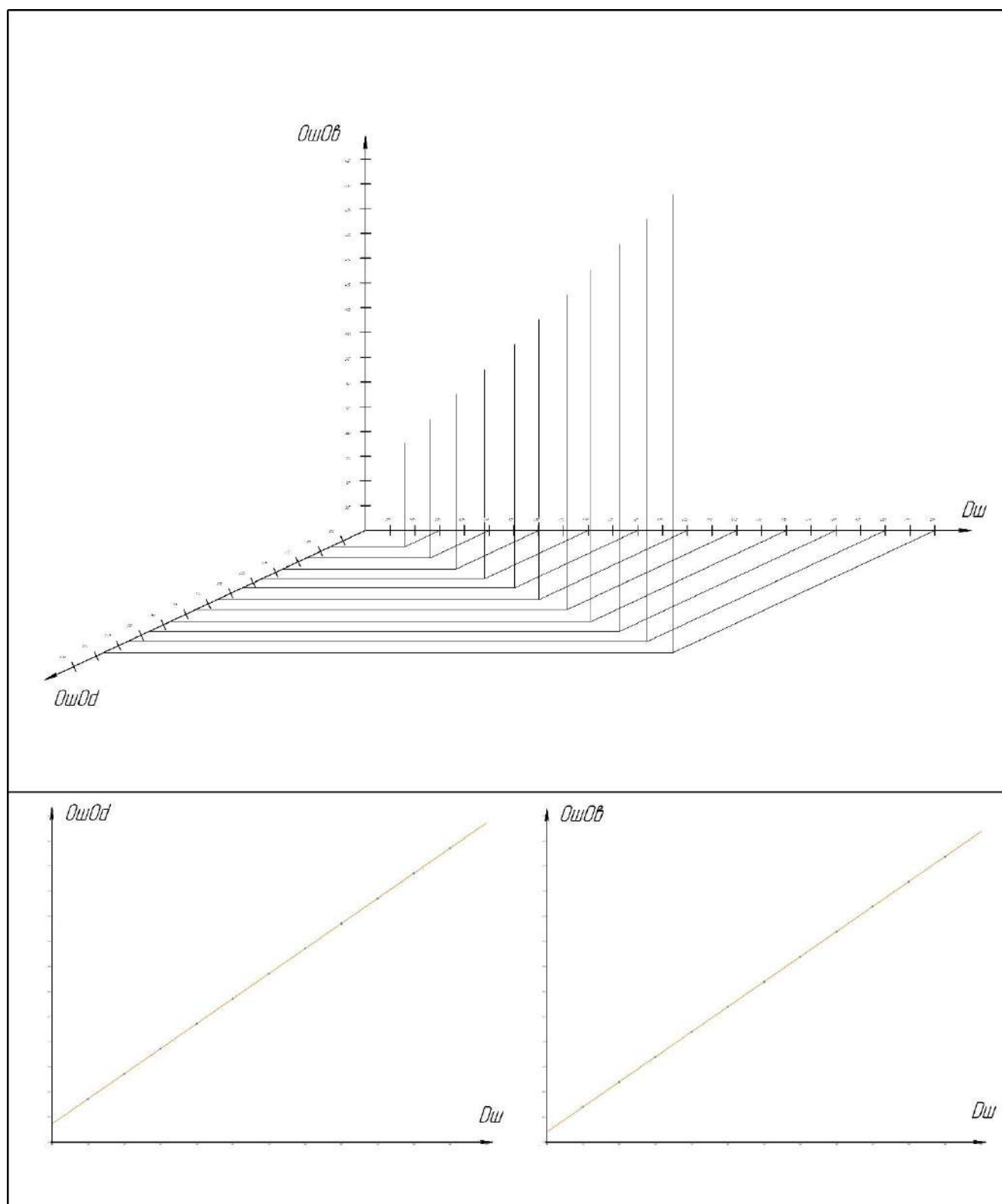


Рисунок 4.17 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшОд$, $OшОв$ и изменением $Dш$.

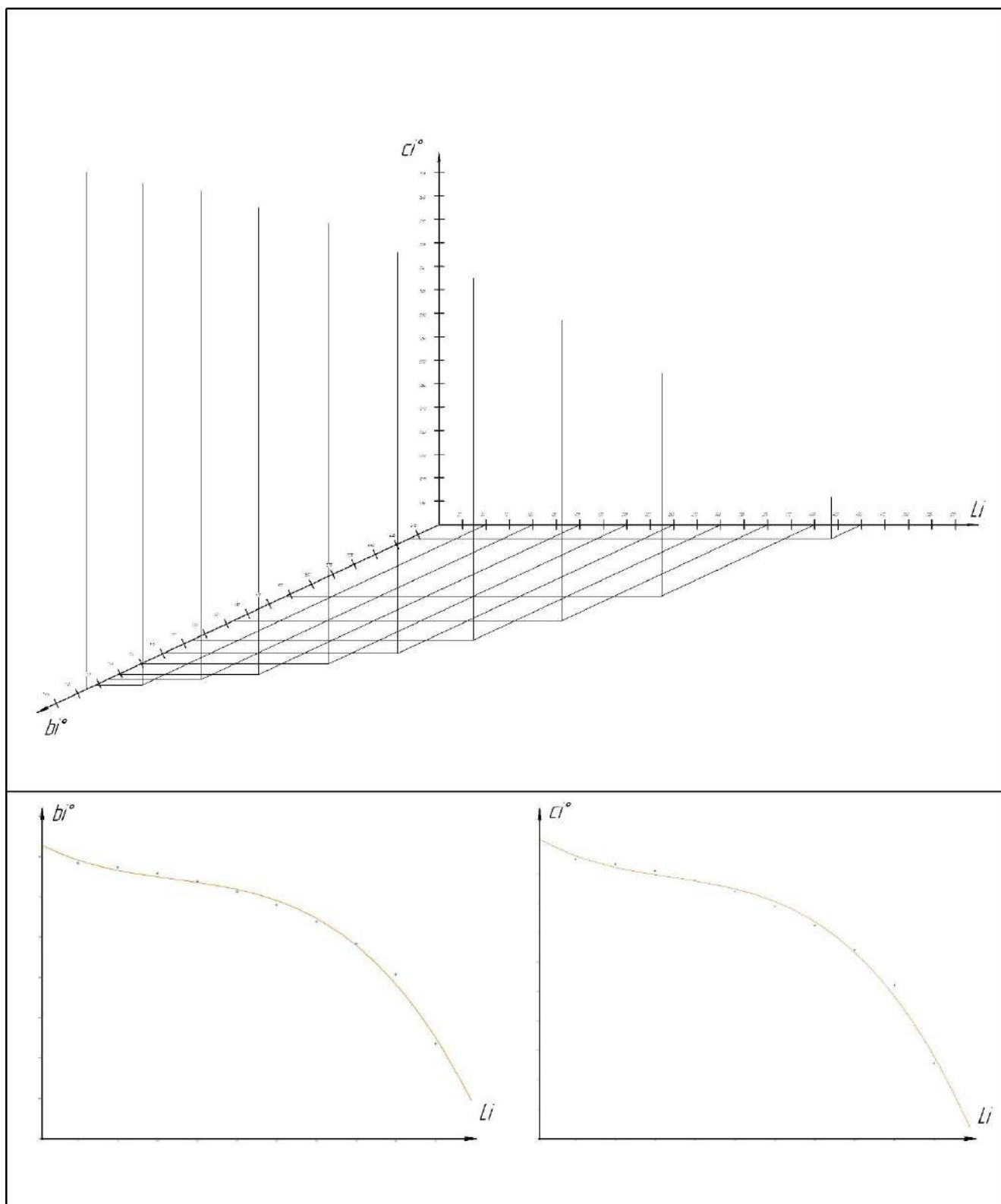


Рисунок 4.18 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между ci° , bi° и изменением Li .

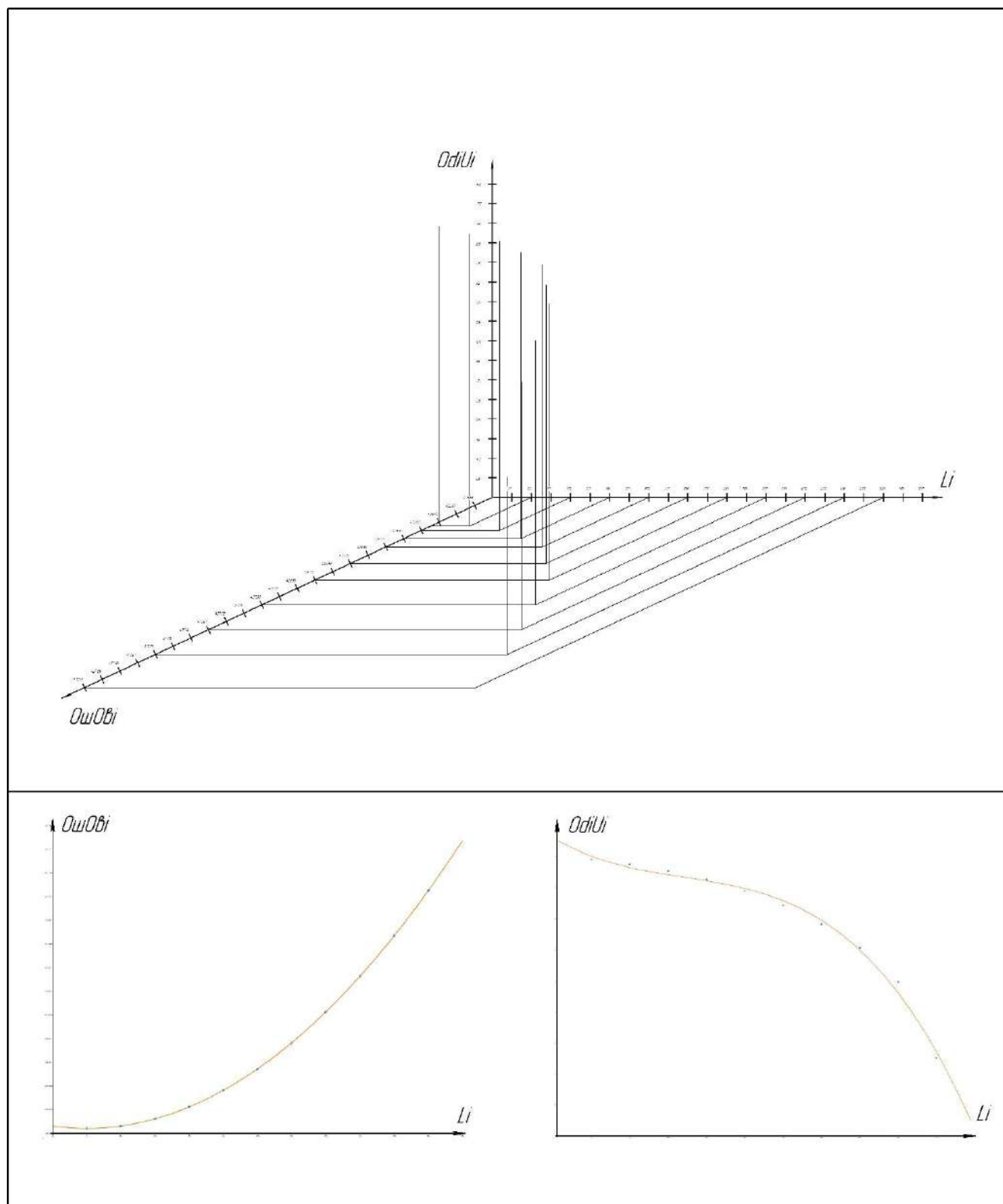
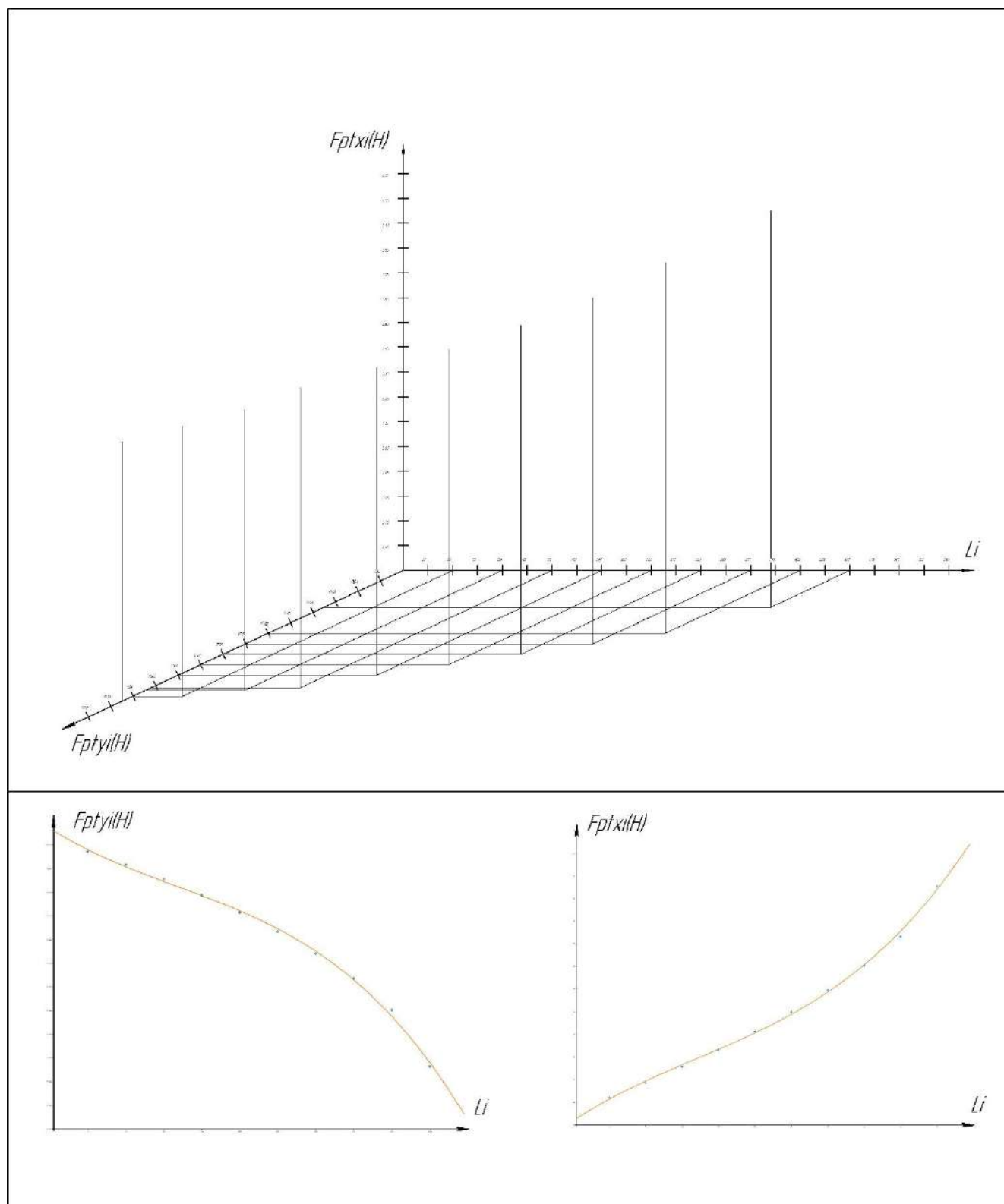


Рисунок 4.19 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между $OшОвi$, $OдиUi$ и изменением Li .



Рисунки 4.20 Результаты экспериментальных исследований взаимовлияния между $F_{ptyi}(H)$, $F_{ptxi}(H)$ и изменением Li .

Таблица 4.2 – Параметры качества обработки

Название детали	Содержание перехода	Требования к характеристикам качества	Технические требования
Кольцо наружное	Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность окончательно	Наружный диаметр	150,15-0,05 мм
		Непостоянство диаметра	0,01 мм
		Непостоянство среднего диаметра	0,01 мм
		Перпендикулярность наружной поверхности относительно базового торца	0,019 мм
		Гранность	0,01 мм
		Отклонение от круглости	0,0025 мм
		Шероховатость	Ra 0,63 мкм
		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Прижоги отсутствуют

Таблица 4.3 – Параметры качества обработки

Название детали	Содержание перехода	Требования к характеристикам качества	Технические требования
Ролик прямолинейный с радиусными скосам, II степени точности	Шлифовать цилиндрическую поверхность роликов предварительно (последние проходы)	Диаметр	27,15-0,02 мм
		Непостоянство диаметра	0,007 мм
		Конусообразность	0,005 мм
		Огранка	0,007 мм
		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Прижоги отсутствуют

Таблица 4.4 - Параметры качества обработки

Название детали	Содержание перехода	Требования к характеристикам качества	Технические требования
Ролик прямолинейный с радиусными скосам, II степени точности	Шлифовать цилиндрическую поверхность роликов чисто	Диаметр	27,065-0,01 мм
		Непостоянство диаметра	0,005 мм
		Конусообразность	0,004 мм
		Огранка	0,007 мм
		Отклонение от круглости	0,0015мм
		Отсутствие прижогов И ВНИПП.101-10	Прижоги отсутствуют

В рамках проведения экспериментальных исследований в соответствии с последовательностью проведения проектных процедур наладки операций проходного бесцентрового шлифования выполнялась проверка требования силового замыкания при наладке посредством определения расположения точек контакта поверхности заготовки с элементами технологической оснастки [47].

Из числа проведенных экспериментов на рисунках 4.21, 4.22 представлены примеры результатов расчетов и иллюстрации расположения точек контактов для анализа выполнения условия силового замыкания для операции предварительного бесцентрового шлифования наружного кольца подшипника 6-170314Ш1.01 и операции предварительного бесцентрового шлифования ролика прямолинейного с радиусными скосами, II степени сложности [47].

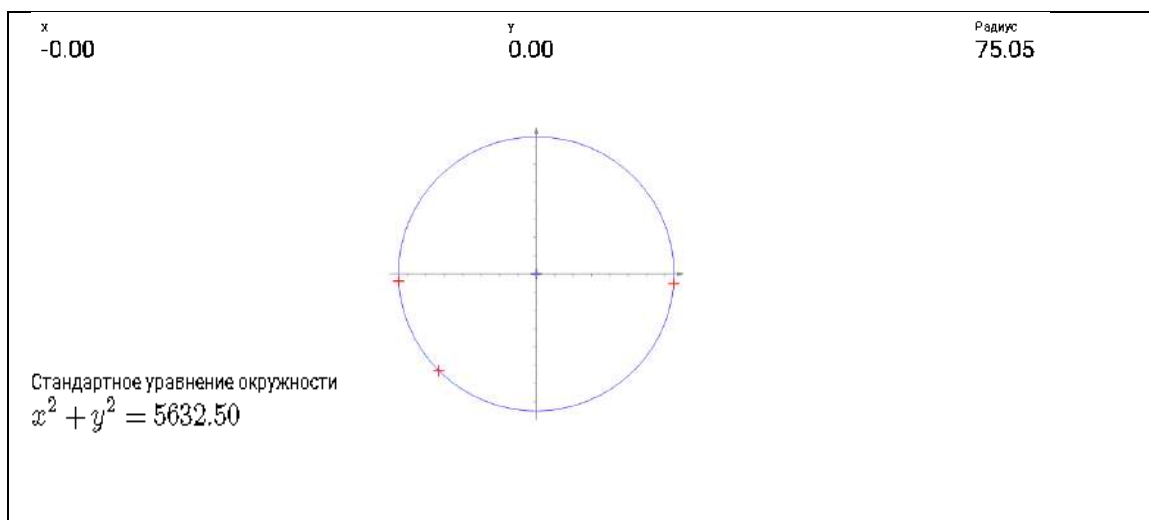


Рис. 4.21 Результаты расчетов выполнения условия силового замыкания для операции предварительного бесцентрового шлифования наружного кольца подшипника

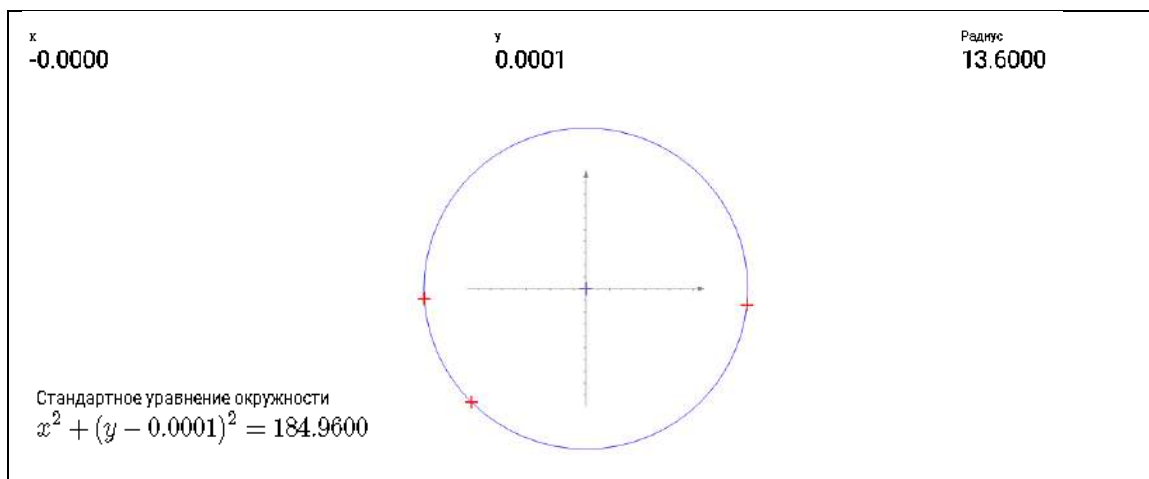


Рис. 4.22 Результаты расчетов выполнения условия силового замыкания для операции предварительного бесцентрового шлифования ролика прямолинейного с радиусными скосами, II степени сложности

В ходе проведения экспериментальных исследований, результаты которых подтвердили работоспособность созданных моделей расчета наладочных параметров, были выбраны удобные формы и порядок занесения данных о реальном состоянии технологической системы и наглядного представления результатов (рисунок 4.23). Такой подход основывался на стремлении к упрощению и наглядности выполнения процедуры с учетом предложений инженерно-технического персонала предприятия [47].

АО "ЕПК Саратов" ПР-8
 Деталь: Кольцо наружное п/ш 6-170314Ш101
 Операция: 108/020 Бесцентрово-шлифовальная
 Оборудование: Sast 200x500
 Содержание перехода: Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность
 предварительно (проход #1)
 Диаметр шлифовального круга – $\phi 500$ мм
 Диаметр ведущего круга – $\phi 315$ мм

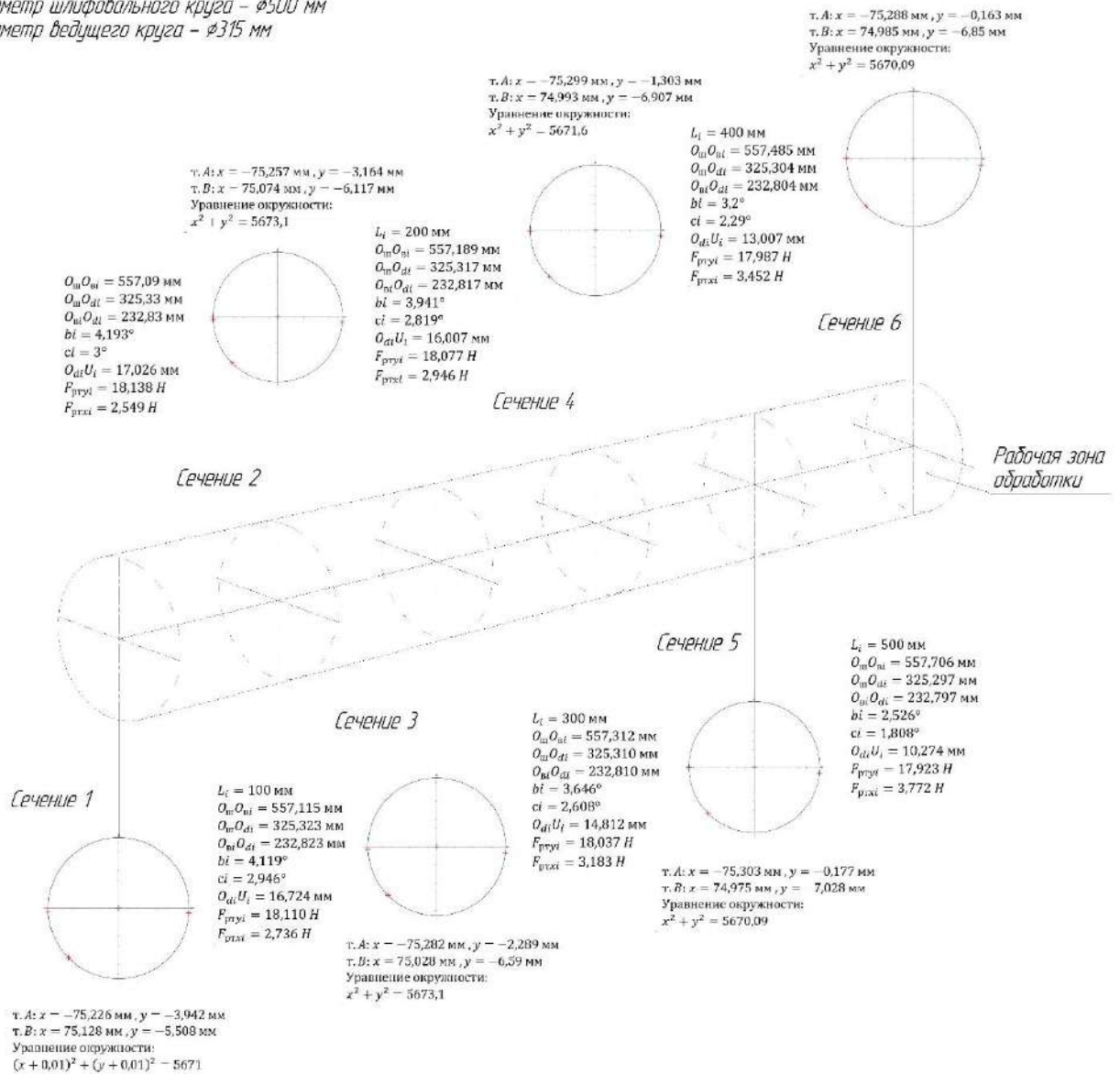


Рис 4.23 Значение параметров в рабочей зоне обработки

4.2. Определение снижения трудоемкости выполнения наладки при использовании разработанных моделей.

Для выполнения нормирования выполнения наладочных операций при проведении промышленных испытаний разработанных моделей использовались [57,70]

На основе, которых и представленных в работе классификаций видов наладок по трудоемкости операций бесцентрового шлифования сформирована таблица преимущественно выполняемых поэлементных работ процессов наладки на операциях проходного бесцентрового шлифования (Таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Преимущественно выполняемые поэлементные работ процессов наладки на операциях проходного бесцентрового шлифования

Наименование элементов наладок	Виды наладок по трудоемкости операций проходного бесцентрового шлифования		
	Полная	Неполная	Частичн.
Установка высоты оси детали (без смены направляющей линейки или подналадки)		*	*
Установка высоты оси детали со сменой направляющей линейки или подналадкой	*		
Настройка расстояния между кругами по контакту шлифовального круга с деталью	*	*	*
Настройка числа оборотов регулирующего круга			
Правка шлифовального круга	*		*
Правка шлифовального круга	*		*
Настройка числа оборотов шлифовального круга	*	*	*
Настройка оси наклона регулирующего круга	*		
Смена шлифующего круга	*		
Смена регулирующего круга	*		
Установка и снятие подводящего лотка	*	*	*
Установка и снятие отводящего лотка	*		*
Зачистка поверхности направляющей линейки	*		

В соответствии с рекомендациями приведенными в сборнике использовались [57] с учетом сложившейся реальной ситуации на обследованных производствах, используемых бесцентровое шлифовальное оборудование, в части организации

труда, технологии выполнения работ, используемого оборудования, механизмов, оснастки и т.д. сформирован диапазоны удельных временных затрат элементов в общей трудоемкости наладочных процессов (таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Диапазон удельных временных затрат элементов в общей трудоемкости наладочных процессов

Наименование элементов наладок	Диапазоны удельной трудоемкости элементов наладок для отдельных видов наладок операций проходного бесцентрового шлифования (%)		
	Полная	Неполная	Частичная
Установка высоты оси детали (без смены направляющей линейки)		56,25%	11,25%
Установка высоты оси детали (со сменой направляющей линейки)	18,51%		
Настройка расстояния между кругами по контакту шлифовального круга с деталью	1,7%	25%	5%
Настройка числа оборотов регулирующего круга	0,64%	9,38%	1,88%
Правка шлифовального круга	4.89%		14,39%
Правка регулирующего круга	7.45%		
Настройка числа оборотов шлифовального круга	0,64%	9,37%	1,88%
Настройка оси наклона регулирующего круга	22,34%		65,6%
Смена шлифующего круга	14.89%		
Смена регулирующего круга	14.89%		
Установка и снятие подводящего лотка	4.25%		
Установка и снятие отводящего лотка	4.25%		
Зачистка поверхности направляющей линейки	5.55%		

Преобладающим видом используемой наладки для условий многономенклатурного производства в практической деятельности используется - неполный. Проведенный анализ представленных службами промышленных предприятий данных и проведенные хронометражи выполнения наладочных процедур для операций проходного бесцентрового шлифования позволил сформировать следующие диапазоны удельной трудоемкости элементов наладок (Таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Диапазон удельной трудоемкости элементов наладок

Наименование элементов наладок	Диапазоны удельной трудоемкости элементов наладок для неполного вида наладок операций проходного бесцентрового шлифования (%)
Установка высоты оси детали (без смены направляющей линейки)	54-68%
Настройка расстояния между кругами по контакту шлифовального круга с деталью	20-26%
Настройка числа оборотов регулирующего круга	6-10%
Настройка числа оборотов шлифовального круга	6-10%

Сокращение временных затрат наладки операций проходного бесцентрового шлифования явилось следствием использования представленных методических разработок и программного обеспечения, имеющих свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (приложения 16,17) [80,81]. По результатам проведенных промышленных экспериментальных исследований приняты решения и получены акты о внедрении в опытную эксплуатацию результатов работы на АО «НПП Алмаз», АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко».

Использование разработанных методических подходов и программного обеспечения процесса настройки позволил снизить в среднем время: установки высоты оси детали на 60%; настройку расстояния между кругами по контакту шлифовального круга с деталью на 35%. Общая трудоемкость процесса настройки в среднем сокращается более, чем на 30%.

Выводы по главе 4

Для оценки работоспособности разработанных моделей, алгоритмов и программного обеспечения методик наладки проходного бесцентрового оборудования выполнены экспериментальные исследования в рамках действующих производственных комплексов: АО «НПП Алмаз»; АО «ЕПК Саратов»; АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко», в диссертационной работе представлены исходные данные использованные при проведении экспериментальных работ применительно к обработке наружных цилиндрических поверхностей деталей кольцо и ролик в условиях ПР-8 и цеха №24 АО «ЕПК Саратов» [53].

В работе представлены графическая интерпретация результатов проведенных экспериментов, устанавливающих для каждого объекта взаимосвязи между наладочными характеристиками и технологическими параметрами реализации операций проходного бесцентрового шлифования. По результатам проведенных промышленных экспериментальных исследований установлены с учетом предложений инженерно-технического персонала предприятия удобные формы и порядок занесения данных о реальном состоянии технологической системы позволяющих упростить и повысить наглядность представления информации. Приняты решения и получены акты о внедрении в опытную эксплуатацию результатов работы.

По результатам экспериментальных исследования подтверждена работоспособность комплекта созданных моделей, используемых при расчете и выборе наладочных параметров. Проведенные экспериментальные исследования доказывают необходимость в серьезной корректировке методических основ технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования, связанных с назначением наладочных параметров по данным о реальном состоянии элементов технологической системы [53].

Проведенное нормирование выполнения трудозатрат при наладке оборудования проходного бесцентрового шлифования показало снижение времени выполнения настройки, в целом не менее чем на 30%, преимущественно за счет исключения процедуры установки высоты оси детали.

Заключение

В работе представлены новые научно обоснованные технологические решения и разработки, направленные на сокращение подготовительно-заключительного времени и обеспечение стабильности параметров качества обрабатываемых поверхностей на операциях проходного бесцентрового шлифования на основе создания методического подхода к технологической подготовке, учитывающего реальное состояние оборудования и средств технического оснащения. Полученные решения отличаются и, в отдельных вопросах, развивают известные подходы к технологическому обеспечению операций, выполняемых на станках бесцентрово-шлифовальной группы [53].

Систематизированы результаты анализа производственного опыта по практическому использованию существующих нормативно-справочных и методических рекомендаций на действующих предприятиях.

Сформирована структурированная база данных способов бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим возможностям и компоновочным схемам используемого оборудования и средств технического оснащения.

Выполнена последовательная кластеризация, построены дендрограммы и сформированы группы способов проходного бесцентрового шлифования, объединенных по критерию однородности проектных процедур при выполнении их технологической подготовки, что позволило объективно определить множества способов для разработки типовых систем проектирования и реализации технологических процессов.

Решена задача определения пространственного расположения мест контактов обрабатываемой поверхности с ведущим, шлифовальным кругами и опорной поверхностью ножа с учетом размерных характеристик элементов технологической системы, и их взаимосвязями во всех сечениях рабочей зоны.

Разработаны формализованные модели и методика, расчета параметров наладки технологических операций проходного бесцентрового шлифования в условиях производства, повышающая объективность и снижающая трудоемкость настройки технологических систем.

Установлено неравномерное распределений величины припуска в рабочей зоне обработки, создана модель для определения составляющих припуска для отдельных секторов в сечениях рабочей зоны.

Выполнен поэлементный расчет составляющих сил, возникающих в процессе реализации технологических операций и рекомендации по выбору режимов обработки на основе известных ограничений.

Разработаны программные средства для расчета уровней иерархии при кластерном анализе способов бесцентрового шлифования; определения мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами оборудования при проходном бесцентровом шлифовании; расчета наладочных параметров операций наружного проходного бесцентрового шлифования.

Выполненные с применением разработанной цифровой модели эксперименты позволили выполнить анализ и подтвердить высокую сложность взаимовлияния большого количества факторов в процессе обработки деталей способом бесцентрового шлифования.

Проведенная апробация теоретических исследований в условия действующих производств подтвердили предложенные положения и разработанные модели. Снижение трудоемкости выполнения наладки составило не менее 30 % и обеспечивалась заданная технологической документацией стабильность точности, перпендикулярность наружной поверхности относительно базового торца, гранности, шероховатости и отсутствие прижогов обрабатываемых поверхностей.

Список использованных источников

1. **Абразивная и алмазная обработка материалов:** справочник / А. Н. Резников [и др.]; под ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. **Автоматическое управление процессами механической обработки: учебник** / Братан С. М., Левченко Е. А., Покинтелица Н. И., Харченко А. О.; Севастопольский гос. ун-т. - М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2018. - 226 с.: ил. - Библиогр.: с. 196-197. - ISBN 978-5-9558-0514-6. - ISBN 978-5-16-012153-6. - ISBN 978-5-16-104959-4.
3. **Ашкиназий, Я.М.** Бесцентровые кругло шлифовальные станки. Конструкции, обработка и правка: монография / Я.М. Ашкиназий; под ред. Б.И. Черпакова; - Москва: Машиностроение, 2003. – 345 с. - Текст: непосредственный.
4. **Базис технологической подготовки машиностроительного производства:** монография / Базров Б. М. - М.: Курс, 2023. - 322 с.: ил. - Библиогр. в конце глав. - Посвящается 300-летию Российской академии наук и 85-летию Ин-та машиноведения им. А. А. Благонравова РАН. - ISBN 978-5-907535-94-7.
5. **Башкин, В.И., Щербаков, В.П.** Способ и устройство динамической балансировки бесцентрово-шлифовальных станков // Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки: Труды ВЗМИ. М., 1982. Вып. 6. С. 90–96.
6. **Безъязычный, В.Ф.** Основы технологии машиностроения: учебник для вузов. — М.: Машиностроение, 2013. — 568 с.: ил.
7. **Беклемишев, Д.В.** Курс аналитической геометрии. М.: Наука, 1971. 328 с. Беляков А.А. Сравнительный анализ DNC-систем управления станками // Станкостроение: базовые и информационные технологии: Сб. трудов ЭНИМС / Под ред. Б.И. Черпакова. М., 2001. С. 112–119.
8. **Бесцентровое шлифование** / Под ред. З.И. Кремня. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1986. 92 с.
9. **Бесцентровые кругло шлифовальные станки** / Б.И. Черпаков, Г.М. Годович, Л.П. Волков и др. М.: Машиностроение, 1973. 168 с.

10. **Бондарь, Л.Ш.** Опорный нож к бесцентрово-шлифовальному станку // Станки и инструмент. 1973. № 12. С. 34.
11. **Бочкарев, П. Ю.** Автоматизация проектных процедур технологической подготовки операций бесцентрового шлифования / П. Ю. Бочкарев, П. В. Малинин // Научные технологии в машиностроении: Материалы XV Международной научно-технической конференции. В 2-х томах, Москва, 01–03 ноября 2023 года. – Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 309-311. – EDN JUJODL.
12. **Бочкарев, П. Ю.** Совершенствование средств технического оснащения операций бесцентрового шлифования на основе кластеризации конструкторско-технологических характеристик / П. Ю. Бочкарев, П. В. Малинин // Актуальные проблемы станкостроения - 2023: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Пенза, 01–03 июня 2023 года. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2023. – С. 356-361. – EDN NYZRPT.
13. **Бржозовский, Б.М.** Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке: монография / Б.М. Бржозовский, О.В. Захаров; под ред. З.И. Шевченко; - Саратов: СГТУ, 2010. – 207 с. - Текст: непосредственный.
14. **Вайс, С.Д.** Методика оценки конкурентоспособности металлорежущих станков. Конструкторско-технологическая информатика 2000 / Труды конгресса. Т. 1. МГТУ "Станкин". М., 2000. С. 90–93.
15. **Вайс, С.Д.** Оценки конкурентоспособности металлорежущих станков // СТИН. 2002. № 1. С. 8–12.
16. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И.** Бесцентрово-шлифовальные станки на выставке 12. ЕМО // СТИН. 1998. № 9. С. 23–28.
17. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И., Ашкиназий, Я.М.** Бесцентрово шлифовальные станки начала XXI века // Технология металлов. 2003. № 7. С. 34–39.

18. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И., Ашкиназий, Я.М.** Исследования бесцентровых круглошлифовальных станков // СТИН. 2001. № 8. С. 23–28.
19. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И., Ашкиназий, Я.М.** Конструкторско-технологические характеристики бесцентровых кругло шлифовальных станков с ведущим кругом // СТИН. 2001. № 9. С. 28–33.
20. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И., Ашкиназий, Я.М.** Перспективные теоретические исследования бесцентровых кругло шлифовальных станков (в печати).
21. **Вайс, С.Д., Черпаков, Б.И., Ашкиназий, Я.М.** Совершенствование приборов правки, применяемых на бесцентрово-шлифовальных станках с ведущим кругом // СТИН. 2002. № 10. С. 34–37.
22. **Васильев, В.А.** Наладка бесцентрово-шлифовальных станков для повышения точности формы деталей // Станки и инструмент. 1980. № 9. С. 7–8.
23. **Взаимозависимость сил при проходном бесцентровом шлифовании** / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, М. О. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 4(68). – С. 149-159. – DOI 10.21685/2072-3059-2023-4-14. – EDN WTNBKV.
24. **Власов, С.Н., Черпаков, Б.И.** Типовые автоматические линии в подшипниковой промышленности. М.: НИИ автосельхозмаш, 1965. 82 с.
25. **Гафт, М.Г., Сергеев, В.И.** Метод многокритериальной оценки технического уровня изделий машиностроения // Проблемы машиностроения и автоматизации. Вып. 18. М.; Будапешт: СЭВ, 1987. С. 31.
26. **Дробашевский, Г.С., Махаринский, Е.И., Купцов, В.П.** Оптимизация наладки бесцентрово-шлифовального станка // Станки и инструмент. 1973. № 9. С. 12–14.
27. **Зубарев Ю.М., Приемышев А.В.** Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов. – СПб.: Издательство «Лань», 2010. – 304 с.

28. **Иванова, Т. Н.** Конструкторско-технологическое обеспечение качества поверхности при шлифовании / Т. н. Иванова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2005. – № 4(29). – С. 28-29. – EDN OWRRBD.

29. **Иванова, Т. Н.** Процесс деформирования поверхностного слоя при шлифовании / Т. Н. Иванова // – 2009. – № 1(37). – С. 80-83. – EDN TSKKNT. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. Т. 2. 4-е изд., перераб. и доп. 1986. 496 с.

30. **Ильиных, А.С.** Формирование качества поверхности при плоском шлифовании торцом круга / А. С. Ильиных // Технология машиностроения. – 2011. – № 4. – С. 19 – 22.

31. **Коломиец, В.В., Полупан, Б.И.** Алмазные правящие ролики при врезном шлифовании деталей машин. Киев: Наук. думка, 1983. 144 с.

32. **Конструирование машин:** Справочно-методическое пособие. В 2 т. / Под общ. ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, 1994. 456 с.

33. **Корчак, С.Н.** Производительность процесса шлифования стальных деталей. – Машиностроение. 1974. – 279 с.

34. **Крисанов, А.Ф., Гвоздецкий, В.Д., Нападайло, И.Т. и др.** Модернизация бесцентрового кругло шлифовального станка, применяемого для зачистки проката // Станки и инструмент. 1966. № 5. С. 42–43.

35. **Крюков, С.А.** Совершенствование абразивного инструмента при производстве подшипников / С. А. Крюков, В. И. Анохин, В. П. Шевчук //142 Прогрессивные технологии в машиностроении: Межвуз. сб. науч. тр. ВолгГТУ. – Вып. 1. – Волгоград, 1998. – С. 23 – 25.

36. **Кудинов, В.А.** Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 350 с.

37. **Кудинов, В.А., Вайс, С.Д.** Устойчивость динамической системы бесцентрово шлифовального станка при работе по следу // Станки и инструмент. 1977. № 8. С. 16–19.

38. **Лоскутов, В.В.** Шлифование металлов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 243 с.

39. **Лурье, Г.Б.** Прогрессивные методы обработки на станках шлифовальной группы. М.: Машиностроение, 1981. 52 с.

40. **Малинин, П.В.** Анализ способа продольного шлифования на бесцентровых кругло-шлифовальных станках / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы XVII Всероссийской заочной научно-практической конференции. В 3-х томах, Камышин, 23–25 ноября 2022 года. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 19-22. – EDN PCARQI.

41. **Малинин, П.В.** Внедрение цифровой экономики в машиностроение. Этапы модернизации технологической подготовки механообрабатывающего производства / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы XV Всероссийской заочной научно-практической конференции (в 2-х томах), Камышин, 23 ноября 2020 года / Волгоградский государственный технический университет (Камышинский филиал). Том 1. – Камышин: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 129-131. – EDN ZKBDBF.

42. **Малинин, П.В.** Группирование по технологическим признакам операций продольного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Воронежский научно-технический Вестник. – 2024. – Т. 1, № 1(47). – С. 61-69. – DOI 10.34220/2311-8873-2024-61-69. – EDN GTTOUB.

43. **Малинин, П.В.** Классификация методов продольного бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим признакам / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Механики XXI века. – 2024. – № 23. – С. 264-269. – EDN NQENYN.

44. **Малинин, П.В.** Кластеризация технологических систем продольного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Автоматизированное проектирование в машиностроении. – 2024. – № 17. – С. 120-122. – DOI 10.26160/2309-8864-2024-17-120-122. – EDN FGCFZE.

45. **Малинин, П.В.** Оптимизация обработки заготовок при продольном шлифовании на бесцентровых круглошлифовальных станках / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // России – творческую молодёжь : Материалы XV Всероссийской научно-практической студенческой конференции в 4-х томах, Камышин, 20–22 апреля 2022 года / Волгоградский государственный технический университет (Камышинский филиал). Том 2. – Камышин: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 23-25. – EDN MYUAPF.

46. **Малинин, П.В.** Основание формирования групп методов продольного бесцентрового шлифования по признакам однородности / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Проблемы машиностроения: современные технологии обработки, материалы, машины, агрегаты: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Махачкала, 11–12 октября 2024 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет, 2024. – С. 13-17. – EDN ZVLSFP.

47. **Малинин, П.В.** Оценка условия силового замыкания при наладке операций проходного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 4(72). – С. 109-117. – DOI 10.21685/2072-3059-2024-4-9. – EDN YVZHEU.

48. **Малинин, П.В.** Повышение эффективности технологической подготовки механообрабатывающего производства в условиях цифровой экономики / П. В. Малинин, Л. Д. Ульянова, П. Ю. Бочкарев // Механика и машиностроение. Наука и практика: материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10 декабря 2021 года / Научно-исследовательский центр «МашиноСтроение». Том №4. – Санкт-Петербург: Индивидуальный предприниматель Жукова Елена Валерьевна, 2021. – С. 36-38. – DOI 10.26160/2658-6185-2021-4-36-38. – EDN HLXOIP.

49. **Малинин, П.В.** Распределение припуска в зоне обработки на операциях проходного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю.

Бочкарев, И. И. Артемов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2025. – № 1(73). – С. 117-131. – DOI 10.21685/2072-3059-2025-1-10. – EDN EJRAWF.

50. **Малинин, П.В.** Снижение трудоемкости наладки операций проходного бесцентрового шлифования / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2024. – № 8(291). – С. 21-30. – DOI 10.35211/1990-5297-2024-8-291-21-30. – EDN BEAQYM.

51. **Малинин, П.В.** Совершенствование наладки бесцентровых шлифовальных станков / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Фундаментальная наука и технологии - перспективные разработки: Материалы XIX международной научно-практической конференции, North Charleston, 10–11 июня 2019 года. Том 2. – North Charleston: LuluPress, Inc., 2019. – С. 60-62. – EDN YSPMUZ.

52. **Малинин, П.В.** Структуризация способов бесцентрового шлифования с использованием кластерного анализа / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2022. – № 8(267). – С. 36-39. – DOI 10.35211/1990-5297-2022-8-267-36-39. – EDN AJUZSZ.

53. **Малинин, П.В.** Установление координатных связей компонентов технологической структуры в пространстве зоны проходной бесцентровой обработки / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2025. – № 1(296). – С. 28-36. – DOI 10.35211/1990-5297-2025-1-296-28-36. – EDN EVCCEE.

54. **Масленников, В.Н.** Бесцентровое шлифование и бесцентровые станки / Объединенное научно-техническое издательство, 1935. 110 с.

55. **Маслов Е.Н.** Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

56. **Машиностроение:** Энциклопедия. Т. 4–7. Металлорежущие станки и деревообрабатывающее оборудование / Черпаков Б.И., Аверьянов О.И., Адоян Г.А. и др. Под ред. Б.И. Черпакова. М.: Машиностроение, 2002. 864 с.

57. **Межотраслевые укрупненные нормативы времени на работы, выполняемые на шлифовальных станках (Единичное и мелкосерийное производство)**, Москва, 2004

58. **Муцянко, В.И.** Бесцентровое шлифование: учебное пособие / В.И. Муцянко, А.Я. Братчиков; 3-е изд., перераб. и доп.; под ред. З.И. Кремня; - Ленинград: Машиностроение, 1986. – 92 с. - Текст: непосредственный.

59. **Муцянко, В.И.** Бесцентровое шлифование: учебное пособие / В.И. Муцянко; 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Машиностроение, 1967. – 116 с. - Текст: непосредственный.

60. **Наерман, М.С.** Прогрессивные процессы абразивной, алмазной и эльборовской обработки в автомобилестроении. М.: Машиностроение, 1976. 32 с.

61. **Научные технологии в машиностроении:** [монография] / Суслов А. Г., Базров Б. М., Безъязычный В. Ф. [и др.]; ред. Суслов А. Г. - М.: Машиностроение, 2012. - 527 с.: ил. - Библиогр. в конце глав. - ISBN 978-5-94275-619-2.

62. **Обоснование параметров наладки операций проходного бесцентрового шлифования** / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, М. О. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2024. – № 3(71). – С. 142-156. – DOI 10.21685/2072-3059-2024-3-13. – EDN RTOSPJ.

63. **Определение наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования** / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, М. О. Гончаров // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2023. – № 3(67). – С. 144-153. – DOI 10.21685/2072-3059-2023-3-11. – EDN SNSELW.

64. **Островский, В.И.** Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. – 144 с.

65. **Потапов, В.А.** Комплектующие элементы станков // Машиностроитель. 1998. № 9. С. 57–65.

66. **Прохоров, А.Ф.** Наладка и эксплуатация бесцентровых шлифовальных станков / А.Ф. Прохоров, К.Н. Константинов, Л.П. Волков; под ред. Л.И. Воронина; - Москва: Машиностроение, 1976. – 191 с. - Текст: непосредственный.

67. **Прохоров, А.Ф.** Оптимизация компоновочной схемы бесцентрового кругло шлифовального станка // Станки и инструмент. 1982. № 6. С. 10–12.

68. **Радзевич, Г.П., Иваненко, Ю.И.** Бесцентровое шлифование прямозубых цилиндрических колес с продольной модификацией зубьев // Машиностроитель. 1994. № 7–8. С. 8–11.

69. **Развитие бесцентрово шлифовальной обработки на основе их классификации** / Л. Д. Ульянова, П. В. Малинин, А. А. Трошин, П. Ю. Бочкарев // Инновационные технологии в обучении и производстве : Материалы XVI Всероссийской заочной научно-практической конференции (в 3-х томах), Камышин, 22–25 ноября 2021 года. Том 3. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 34-38. – EDN MJUPDE.

70. **Раздел II Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках** (Массовое, крупносерийное, серийное, мелкосерийное и единичное производство) Режимы резания металлов: Справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман, А.И. Гдалевич и др. М.: НИИТавтопром, 1995. 456 с.

71. **Резников, А. Н.** Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.

72. **Романов, В.Л.** Динамическая теория формообразования при бесцентровом шлифовании // Труды ИМАШ. Вып. 19, 1965.

73. **Романов, В.Л.** Использование металлических ведущих кругов на бесцентрово-шлифовальных станках // Станки и инструмент. 1967. № 2. С. 19–20.

74. **Романов, В.Л.** Исправление некруглости при шлифовании с постоянным усилием // Станки и инструмент. 1966. № 1. С. 22–24.

75. **Романов, В.Ф., Авакян, В.В.** Правка и профилирование абразивного, алмазного и эльборового инструмента. М.: Машиностроение, 1976. 29 с.

76. **Романов, В.Ф., Авакян, В.В.** Технология алмазной правки шлифовальных кругов. М.: Машиностроение, 1980. 118 с.

77. **Романовский, В.И.** Основные задачи теории ошибок. М.: Гостехиздат, 1947. 512 с.

78. **Рувинов, Д.Я.** Автоматическая загрузка бесцентрово-шлифовальных станков / Д.Я. Рувинов; под ред. В.А. Семенченко; - Москва: МАШГИЗ, 1963. – 105 с. - Текст: непосредственный.

79. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023610672 Российская Федерация.** Программа для расчета уровней иерархии при кластерном анализе способов бесцентрового шлифования: № 2022685957: заявл. 25.12.2022: опубл. 12.01.2023 / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, В. В. Шалунов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение национальные технологические системы и комплексы». – EDN OPKWBF.

80. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617977 Российская Федерация.** Программа расчета наладочных параметров операций наружного проходного бесцентрового шлифования: № 2024617146: заявл. 08.04.2024: опубл. 08.04.2024 / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – EDN UHCNOJ.

81. **Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617988 Российская Федерация.** Программа определения мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами оборудования при проходном бесцентровом шлифовании: № 2024617154: заявл. 08.04.2024: опубл. 08.04.2024 / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет». – EDN WDZRFA.

82. **Свидинский, А.С., Анциферов, В.А.** Нож к бесцентрово-шлифовальным станкам, армированный твердым сплавом // Станки и инструмент. 1970. № 12. С. 39.

83. **Слонимский, В.И.** К анализу процесса круглого наружного бесцентрового шлифования. Бюллетень ЦНИЛАШ, 1938, №7-8.

84. **Слонимский, В.И.** Обоснование возможностей применения круглого наружного бесцентрового шлифования вместо центрового при обработке валов. ЛПИ. 1940

85. **Слонимский, В.И.** Теория и практика бесцентрового шлифования / В.И. Слонимский; 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: МАШГИЗ, 1952. – 278 с. - Текст: непосредственный.

86. **Совершенствование обработки на бесцентрово шлифовальных станках** / А. А. Трошин, Л. Д. Ульянова, П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы XVI Всероссийской заочной научно-практической конференции (в 3-х томах), Камышин, 22–25 ноября 2021 года. Том 3. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 30-33. – EDN VCMCLZ.

87. **Совершенствование технологической подготовки операций бесцентрового шлифования** / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, Л. Д. Ульянова, В. В. Шалунов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 4(64). – С. 147-160. – DOI 10.21685/2072-3059-2022-4-12. – EDN RGAJMX.

88. **Сороколетов, Л.А.** Точностные характеристики металлообрабатывающего оборудования // Исследования металлорежущих станков: Сборник / Под ред. Н.С. Ачеркана. М.: Машиностроение, 1968. С. 372–381.

89. **Справочник технолога** / Суслов А. Г., Безъязычный В. Ф., Базров Б. М. [и др.] ; общ. ред. Суслов А. Г. - М. : Инновационное машиностроение, 2019. - 799 с. : ил. - ISBN 978-5-907104-23-5.

90. **Суслов, А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.
91. **Суслов, А.Г., Дальский, А.М.** Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
92. **Суслов, А.Г., Захаров, А.Е.** Нормализованный контроль контактной жесткости обработанных поверхностей деталей // Контроль. Диагностика. 2000. № 12. С. 21–25.
93. **Технологические процессы в машиностроении.** Назначение режимов резания и нормирование операций механической обработки заготовок в машиностроении: учебное пособие для СПО / Ю. М. Зубарев, А. В. Приемышев, В. Г. Юрьев, М. А. Афанасенков; под редакцией Ю. М. Зубарев. — 4-е изд., стер. — Санкт-Петербург: Лань, 2025. — 248 с. — ISBN 978-5-507-50758-0.
94. **Ульянова, Л. Д.** Актуальные проблемы физико-технической обработки материалов на современном этапе развития промышленности / Л. Д. Ульянова, П. В. Малинин // России – творческую молодёжь: Материалы XIV Всероссийской научно-практической студенческой конференции (в 5-ти томах), Камышин, 12–13 мая 2021 года. Том 2. – Камышин: Волгоградский государственный технический университет, 2021. – С. 42-44. – EDN LTASDU.
95. **Ульянова, Л. Д.** Классификационные признаки способов обработки деталей на бесцентрово-шлифовальном оборудовании / Л. Д. Ульянова, П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2021. – № 8. – С. 31-33. – DOI 10.26160/2541-8637-2021-8-31-33. – EDN WIROOR.
96. **Ульянова, Л. Д.** Структуризация способов бесцентрового шлифования / Л. Д. Ульянова, П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Инновационные технологии в обучении и производстве: Материалы XVII Всероссийской заочной научно-практической конференции. В 3-х томах, Камышин, 23–25 ноября 2022 года. Том 1. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2022. – С. 28-30. – EDN LYRMVM.

97. **Фещенко, В.Н.** Правка шлифовальных кругов алмазными роликами // Станки и инструмент. 1972. № 6. С. 37–40.
98. **Филимонов, Л.Н.** Высокоскоростное шлифование. – Л.: Машиностроение. 1979. – 246 с.
99. **Филькин, В.П.** Прогрессивные методы бесцентрового шлифования / В.П. Филькин, И.Б. Колтунов; под ред. Б.П. Святых; - Москва: Машиностроение, 1971. – 203 с. - Текст: непосредственный.
100. **Хомяков, В.С., Вайс, С.Д.** Анализ динамического качества бесцентрово-шлифовальных станков с широким кругом //СТИН. 1999. № 1. С. 5–7.
101. **Худобин, Л.В.** Современные СОЖ и их применение при обработке металлических заготовок резанием / Л.В. Худобин, Е.С. Киселев. - М.: Машиностроение, 2006. – 24 с.
102. **Черпаков, Б.И.** Приборы правки бесцентровых круглошлифовальных автоматов. М.: ГОСИНТИ, 1964. № 6-64-1466/34. 10 с.
103. **Черпаков, Б.И.** Автоматизация шлифовальной обработки прутков. М.: ГОСИНТИ, 1970. ОМТ № 2/95-70. 26 с.
104. **Шумячер, В.М.** Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов: монография / В. М. Шумячер, А. В. Славин, С. А. Крюков; под общ. ред. В. М. Шумячера; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т, ВИСТех (филиал) Волгогр. гос. архит.- строит. ун-та. – Волгоград: ВолгГАСУ, 2015. – 135 с.
105. **Щербаков, В.П., Зайцев, В.М.** О балансировке кругов бесцентровых круглошлифовальных станков с широкими кругами // Труды ВЗМИ. Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. М., 1982. Вып. 6. С. 72–76.
106. **Эльянов, В.Д.** Прогрессивные режимы шлифования / Специнформцентр НПО ВНИПП. М., 1989. 84 с.
107. **Ящерицын, П.И.** Повышение качества шлифовальных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск: Наука и техника, 1972. – 480 с.

108. **Between centers and centerless grinding in one setup.** Koepfer Chris // Mod. Mach. Shop. 2001. 74. № 6. P. 68–69.
109. **CNC centerless grinder with laser gaging** // Metlfax. 2001. 45. № 7. P. 105.
110. **Effectiv Rundschleifen ohne Spitzen.** Tschudin Urs // Werkstatt und Betr. 2001. 134. № 9. P. 98, 101–103.
111. **Grinder for WC rods** // Cutt. Tool Eng. 2001. 53. № 2. P. 68.
112. **Hashimoto, F.** Effects of friction and wear characteristics of regulating wheel on centerless grinding. (Abrasives. Centerless grinding / coated abrasives). Aug. 2000. P. 8–15.
113. **Ihasaki, I., Okamura, K.** Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals // Annals of CIRP. 1985. T. 34. P. 277–280.
114. **Malinin, P.V.** Improved efficiency of technological preparation of manufacturing technologies in digital economy / P. V. Malinin, P. Yu. Bochkarev // Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Cientific conference abstracts XVI International Forum-Contest of Students and Young Researchers, Saint-Petersburg, 17–19 июня 2020 года. Vol. Part 2. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – P. 171-172. – EDN ZZIJZE.
115. **Mineralgussgestelle in Schleifmaschinen. Mushardt Heinrich** // Werkstatt und Betr. 2001. 134. № 12. P. 65–66, 68–69.
116. **OD finishing** // Tool. and Prod. 2001. 66. № 11. P. 89.
117. **Rotary cutting tools** // Manuf. Eng. (USA). 2000. 124. № 5. P. 202.
118. **Shin, A.J.** A New Regulating Wheel Truing Method for Through-Feed Centerless Grinding // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2001. Vol. 123. P. 319–324.
119. **Spitzenlos schleifen mit Schnellwechsler** // Werkstatt und Betr. 2001. 134. № 5. P. 45.

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко»

Подразделение – цех 24

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

Модель – 3Д180

производитель – Станкостроительный завод им. С.М. Кирова (г. Витебск)

заводской номер – 69026

год выпуска – 1969

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 200 мм

Ведущие круги - 150 мм

Ширина (высота) кругов - 200

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2°

Особенности наладки:

Припуск – 0,02 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 40%

Правка шлифовального круга – 1 раз в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3-4 смены

Место перекреста кругов - не определяется

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода ведущего круга;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 2°;

- опорный нож по высоте устанавливается с помощью регулировочных винтов;

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа осуществляется по слуху для установления момента их контакта в процессе подвода шлифовального круга, с последующим отводом круга на величину примерно равную 0,01 мм.

Пример типовой детали:

Наименование – пруток (подготовка для операций, выполняемых на высокоточных автоматах продольного точения)

Материал – Ст10 ГОСТ 1050-2013

Диаметр – 10-25 мм

Длина – 30 мм

Шлифовальный круг - 200*32*76 64С F100L 6V 35

Ведущий круг – ПП 150*40*65 14А F60 Р R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «ПО «СТАРТ» им. М.В. Проценко»

Подразделение – цех 24

ФИО наладчика – *****

Контактные данные – *****

Оборудование

Модель – 3Д180

производитель – Станкостроительный завод им. С.М. Кирова (г. Витебск)

заводской номер – 69026

год выпуска – 1969

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 200 мм

Ведущие круги – 160 мм

Ширина (высота) кругов - 200

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2°

Особенности наладки:

Припуск – 0,02 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 40%

Правка шлифовального круга – 1 раз в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3-4 смены

Место перекреста кругов- не определяется

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода ведущего круга;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 2°;

- опорный нож по высоте устанавливается с помощью регулировочных винтов;

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа осуществляется по слуху для установления момента их контакта в процессе подвода шлифовального круга, с последующим отводом круга на величину примерно равную 0,01 мм.

Пример типовой детали:

Наименование – прутки (подготовка для операций, выполняемых на высокоточных автоматах продольного точения)

Материал – Ст10 ГОСТ 1050-2013

Диаметр – 10-25 мм

Шлифовальный круг - 200*32*76 64C F100L 6V 35

Ведущий круг – ПП 150*40*65 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «НПП «Алмаз»

Подразделение – КМЦ

ФИО наладчика – *****

Контактные данные – *****

Оборудование

модель 3В182

производитель – Станкостроительный завод им. С.М.Кирова

заводской номер – №69029

год выпуска – 1969

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - до 300 мм.

Ведущие круги – до 250 мм.

Ширина (высота) кругов 150-200 мм.

Угол наклона опорного ножа – 30 °.

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 1.5 – 2 °.

Особенности наладки:

- шлифовальный круг неподвижный (настройки ведутся перемещением ведущего круга в горизонтальной плоскости за счет ручного подвода с помощью двух *барашков* с разной точностью;
- «центр ножа» на 0.1 мм ниже центра шлифовального круга;
- расстояние между корпусом опорного ножа и шлифовальным кругом минимальное, для большей жесткости технологической системы;
- между корпусом ножа и шлифовальным кругом зазор должен быть не менее 2 мм для отвода стружки;
- настроечным параметром является расстояние между центром обрабатываемой детали и вершиной опорного ножа;
- плоскость зоны обработки в которой центры шлифовального и ведущего кругов лежат в одной горизонтальной плоскости располагается в начале калибрующей части;
- износ шлифовального круга (по диаметру) может достигать 40 процентов.

Пример типовой детали:

Наименование – Ролик подшипника.

Материал – ШХ 15 ГОСТ 801-2022

Диаметр – 20 мм (точность – 2 мкм)

Припуск при окончательном шлифовании – 10 мкм

Длина – 25 мм.

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1

Ведущий круг – вулканитовый (среднетвердый) ПП 150x400x65 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «НПП «Алмаз»

Подразделение – КМЦ

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель JHC – 125 (JAINNHER)

производитель – TAIWAN

заводской номер – 12S430Y

год выпуска – 09.2010

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 200 – 400 мм.

Ведущие круги – 100 – 300 мм.

Ширина (высота) кругов 150-200 мм.

Угол наклона опорного ножа – 30 °.

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 1.5 – 2 °.

Особенности наладки:

- шлифовальный круг неподвижный (настройки ведутся перемещением ведущего круга в горизонтальной плоскости за счет ручного подвода с помощью двух *барашков* с разной точностью;
- «центр ножа» на 0.1 мм ниже центра шлифовального круга;
- расстояние между корпусом опорного ножа и шлифовальным кругом минимальное, для большей жесткости технологической системы;
- между корпусом ножа и шлифовальным кругом зазор должен быть не менее 2 мм для отвода стружки;
- настроечным параметром является расстояние между центром обрабатываемой детали и вершиной опорного ножа;
- плоскость зоны обработки в которой центры шлифовального и ведущего кругов лежат в одной горизонтальной плоскости располагается в начале калибрующей части;
- износ шлифовального круга (по диаметру) может достигать 50 процентов.

Пример типовой детали:

Наименование – Ролик подшипника.

Материал – ШХ 15 ГОСТ Р 56299-2014

Диаметр – 20 мм (допуск – 2 мкм)

Припуск при окончательном шлифовании – 10 мкм

Длина – 25 мм.

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 40 K 6 V 50 1; 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1

Ведущий круг – вулканитовый (среднетвердый) 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ЕПК Саратов»
Подразделение – Цех высокоточных подшипников (Цех №8)
Участок окончательной обработки
ФИО наладчика – *****|
Контактные данные - *****

Оборудование

модель SASL5/AD
производитель – Германия (ГДР)
заводской номер – 002344013
год выпуска – 1988

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 500 мм
Ведущие круги – 315 мм
Ширина (высота) кругов
Угол наклона опорного ножа – 45°
Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 3°

Особенности наладки:

Угол наклона ведущего круга при переналадке не меняется
Шлифовальный круг не подвижен, привод ведущего круга
Допуск до 20 мкм
Максимальный припуск – 100 мкм за проход
Износ шлифовального круга (после правок) до 70%
Правка шлифовального круга – примерно через 2 часа работы
Правка ведущего круга – очень редко
Место перекреста кругов- середина рабочей зоны
Наладка – высота ножа по середине опорной поверхности, расстояние от этой точки до основания ножа.

Пример типовой детали:

Наименование – кольцо наружное п/ш 215
Материал – ШХ15СГ ГОСТ 801-2022
Диаметр – 215 мм

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ЕПК Саратов»

Подразделение – Цех №24

Участок бесцентрового шлифования

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель SASL 125

производитель – Германия (ГДР)

заводской номер – 02344058

год выпуска – 1982

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 500 мм

Ведущие круги – 315 мм

Ширина (высота) кругов

Угол наклона опорного ножа – 30°; 45°; 60°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – до 4°

Особенности наладки:

Припуск 10 мкм на диаметр

Подача роликов – обязательно подпор

Шлифовальный круг не подвижен, привод ведущего круга

Максимальный припуск – 100 мкм за проход

Износ шлифовального круга (после правок) до 60%

Правка шлифовального круга – примерно через 2 часа работы (2 ящика)

Правка ведущего круга – 1 раз в месяц

Место перекреста кругов- не учитывается

Наладка – высота ножа по середине опорной поверхности, расстояние от этой точки до основания ножа.

Пример типовой детали:

Наименование – Ролик

Материал – шх15СГ ГОСТ 801-2022

Диаметр – 36 мм

Длина – 58 мм.

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ЕПК Саратов»

Подразделение – Цех №24

Участок бесцентрового шлифования

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель SASL 200*500

производитель – Германия (ГДР)

заводской номер – 02344064

год выпуска – 1988

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 500 мм

Ведущие круги – 315 мм

Ширина (высота) кругов

Угол наклона опорного ножа – 30°; 45°; 60°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – до 4°

Особенности наладки:

Припуск 10 мкм на диаметр

Подача роликов – обязательно подпор

Шлифовальный круг не подвижен, привод ведущего круга

Максимальный припуск – 100 мкм за проход

Износ шлифовального круга (после правок) до 60%

Правка шлифовального круга – примерно через 2 часа работы (2 ящика)

Правка ведущего круга – 1 раз в месяц

Место перекреста кругов- не учитывается

Наладка – высота ножа по середине опорной поверхности, расстояние от этой точки до основания ножа.

Пример типовой детали:

Наименование – Ролик

Материал – шх15СГ

Диаметр – 36 мм

Припуск при окончательном шлифовании

Длина – 58 мм.

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ЕПК Саратов»

Подразделение – Цех №24

Отделение окончательной обработки

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель SASL5/AD

производитель – Германия (ГДР)

заводской номер – 002344045

год выпуска – 1988

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 500 мм

Ведущие круги – 315 мм

Ширина (высота) кругов

Угол наклона опорного ножа – 30°; 45°; 60°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – до 3°

Особенности наладки:

Припуск 10 мкм на диаметр

Подача роликов – обязательно подпор

Шлифовальный круг не подвижен, привод ведущего круга

Максимальный припуск – 100 мкм за проход

Износ шлифовального круга (после правок) до 60%

Правка шлифовального круга – примерно через 2 часа работы (2 ящика)

Правка ведущего круга – 1 раз в месяц

Место перекреста кругов- не учитывается

Наладка – высота ножа по середине опорной поверхности, расстояние от этой точки до основания ножа.

Пример типовой детали:

Наименование – ролик

Материал – шх15СГ

Диаметр – 36 мм

Припуск при окончательном шлифовании

Длина – 58 мм.

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – ООО «СТМ-технологии»

Подразделение – цех 1

Участок бесцентрово-шлифовальных станков

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

Модель – 3Е183В

производитель – Витебский станкостроительный завод

заводской номер – 36076

год выпуска – 1989

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 350 мм

Ведущие круги – 150 мм

Ширина (высота) кругов - 100

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2°

Особенности наладки:

Припуск – 0,008-0,01 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 50%

Правка шлифовального круга – 2 раза в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3 смены

Место перекреста кругов- не определяется (визуально контролируется контакт шлифовального круга с заготовкой во всей зоне обработки)

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода, шлифовального и ведущего кругов;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 2°;

- опорный нож по высоте устанавливается с помощью эксцентриков;

- выдерживается место контакта заготовки с серединой опорной поверхности ножа;

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа определяется на основе опыта наладчика в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности заготовки.

Пример типовой детали:

Наименование – Втулка

Материал – ВК8 ГОСТ 3882-74

Диаметр – 23 мм

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1

Ведущий круг – ПП 150*40*65 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – ООО «СТМ-технологии»

Подразделение – цех 1

Участок бесцентрово-шлифовальных станков

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

Модель – 3М182

производитель – станкостроительный завод имени С.М. Кирова

заводской номер – 77222

год выпуска – 1968

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 350 мм

Ведущие круги – 150 мм

Ширина (высота) кругов - 100

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2°

Особенности наладки:

Припуск – 0,008-0,01 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 50%

Правка шлифовального круга – 2 раза в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3 смены

Место перекреста кругов- не определяется (визуально контролируется контакт шлифовального круга с заготовкой во всей зоне обработки)

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода, шлифовального и ведущего кругов;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 2°;

- опорный нож по высоте устанавливается с помощью эксцентриков;

- выдерживается место контакта заготовки с серединой опорной поверхности ножа;

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа определяется на основе опыта наладчика в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности заготовки.

Пример типовой детали:

Наименование – втулка

Материал – ВК8 ГОСТ 3882-74

Диаметр – 23 мм

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1

Ведущий круг – ПП 150*40*65 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – ООО «СТМ-технологии»

Подразделение – цех 1

Участок бесцентрово-шлифовальных станков

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

Модель – 3М182

производитель – станкостроительный завод имени С.М. Кирова

заводской номер –33278

год выпуска – 1968

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 350 мм

Ведущие круги – 150 мм

Ширина (высота) кругов - 100

Угол наклона опорного ножа – 30°

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2°

Особенности наладки:

Припуск – 0,008-0,01 мм

Износ шлифовального круга (после правок) – 50%

Правка шлифовального круга – 2 раза в смену

Правка ведущего круга – 1 раз в 3 смены

Место перекреста кругов- не определяется (визуально контролируется контакт шлифовального круга с заготовкой во всей зоне обработки)

- регулировка межцентрового расстояния за счет подвода, шлифовального и ведущего кругов;

- угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости, не изменяется - 2°;

- опорный нож по высоте устанавливается с помощью эксцентриков;

- выдерживается место контакта заготовки с серединой опорной поверхности ножа;

- зазор между поверхностями шлифовального круга и ножа определяется на основе опыта наладчика в зависимости от диаметра обрабатываемой поверхности заготовки.

Пример типовой детали:

Наименование – втулка

Материал – ВК8 ГОСТ 3882-74

Диаметр – 23 мм

Длина – 30 мм

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 50 K 6 V 50 1

Ведущий круг – ПП 150*40*65 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – ООО «СЭПО-ЗЭМ»

Подразделение – Инструментальный цех

ФИО наладчика – *****

Контактные данные – *****

Оборудование

модель 3Е183В

производитель – Витебский станкостроительный завод

заводской номер – №42115482

год выпуска – 2021

Законсервирован 09.01.2023 г. (отсутствие квалифицированных наладчиков)

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги -

Ведущие круги –

Ширина (высота) кругов

Угол наклона опорного ножа –

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости –

Особенности наладки:

Пример типовой детали:

|

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «Титан- Баррикады»

Подразделение – Метизный цех

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель ~~Stanexim~~ Stanexim BCA 183 NC22 с ЧПУ

производитель – MASHINE TOOLS AND TECHNOLOGY (Беларусь)

заводской номер – 0001

год выпуска – 2018

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 370 – 500 мм.

Ведущие круги – 295 – 350 мм.

Ширина (высота) кругов 260 мм.

Угол наклона опорного ножа – 30 °.

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 1 ° (постоянный).

Особенности наладки:

- при наладке перемещаются шлифовальный и ведущий круги;
- регулировка опорного ножа выполняется посредством эксцентриситета;
- настройка расположения центра заготовки и осей кругов выполняется на основе опыта;
- расстояние между опорным ножом и шлифовальным кругом – 1 мм;
- допуски (наиболее высокие требования) - ± 0.005 - 0.005 мм/;
- плоскость рабочей зоны в которой выполняется наладка не определяется;
- припуск – до 0.2 мм.
- правка шлифовального круга при непрерывной работе 1 раз 2 в смены;
- правка ведущего круга – 1 раз в 2 месяца;
- износ шлифовального и ведущего кругов – до 50%.

Пример типовой детали:

Наименование – Крюк.

Материал – Ст 40-В-Н ГОСТ 4543-2016

Диаметр – 7.8 мм

Припуск при окончательном шлифовании – 10 мкм

Длина – 190 мм.

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25A 40 K 6 V 50 1

Ведущий круг – 14A F60 P R

Анкета по результатам опроса наладчиков станков бесцентрового шлифования.

Наименование предприятия – АО «ФНПЦ «Титан- Баррикады»

Подразделение – Метизный цех

ФИО наладчика – *****

Контактные данные - *****

Оборудование

модель 3В182

производитель – Станкостроительный завод им. С.М. Кирова (г. Витебск)

заводской номер – 70032

год выпуска – 1970

Предельные размеры используемой технологической оснастки и настроечных параметров

Шлифовальные круги - 400 мм.

Ведущие круги – 300 мм.

Ширина (высота) кругов 250 мм.

Угол наклона опорного ножа – 45 °.

Угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости – 2 ° (постоянный).

Особенности наладки:

- при наладке перемещаются шлифовальный и ведущий круги;
- регулировка опорного ножа выполняется посредством эксцентриситета;
- настройка расположения центра заготовки и осей кругов выполняется на основе опыта;
- расстояние между опорным ножом и шлифовальным кругом – 1 мм;
- плоскость рабочей зоны в которой выполняется наладка не определяется;
- износ шлифовального и ведущего кругов – до 60%.

Пример типовой детали:

Наименование – Ролик

Материал – 12Х18Н9 ГОСТ 5632- 2014

Диаметр – 18 мм

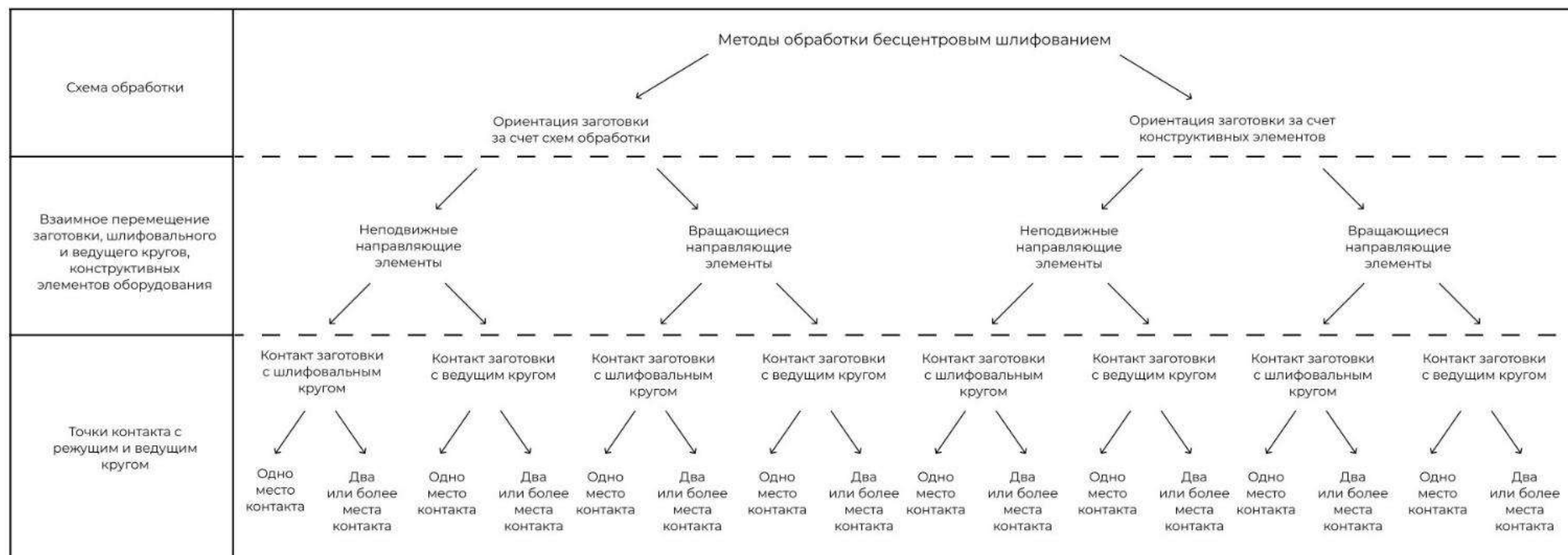
Припуск при окончательном шлифовании – 10 мкм

Длина – 36 мм.

Шлифовальный круг - 7 305 150 120 25А 50 К 6 V 50 1

Ведущий круг –14А F60 Р R

Приложение 2



Приложение 3

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов													
Места контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса													
Вид обрабатываемой поверхности							Привод вращения заготовки		Количество шлифовальных кругов		Виды движения шлифовального круга		
Наружные				Внутренние									
Цилиндрическая	Конусная	Фасонная поверхность	Шаровидная	Цилиндрическая	Конусная	Сложного профиля	От ведущего круга	От планшайбы (приспособление)	Один	Два	Круговое	Осциллирующее	Круговое и осциллирующее

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов										
Места контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса										
Форма профиля шлифовального круга			Количество ведущих кругов		Виды движения ведущего круга			Форма профиля ведущего круга		
Цилиндрическая	Коническая	Сложная	Один	Два и более	Круговое	Осциллирующее	Круговое и осциллирующее	Цилиндрическая	Коническая	Сложная

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов						
Места контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса						
Конструкция установочных (направляющих) элементов			Базирование по		Базовые поверхности	
Направляющая линейка	Вращающийся ролик	Неподвижные опоры	Обрабатываемой поверхности	Обработанной поверхности	Обрабатываемая поверхность	Обрабатываемая поверхность + торцевая

Приложение 4

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов												
Наличие и направление сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса												
Вид обрабатываемой поверхности							Конструкция обрабатываемой детали		Конструктивная схема	Схемы шлифования		
Наружные				Внутренние								
Цилиндрическая	Конусная	Фасонная поверхность	Шаровидная	Цилиндрическая	Конусная	Сложного профиля	Простая	Сложная	Расположение ведущего и шлифовального кругов в горизонтальной плоскости	Расположение ведущего и шлифовального кругов в смещенной от горизонтали плоскости	Попутное шлифование	Встречное шлифование

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов												
Наличие и направление сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса												
Направление движения шлифовального круга		Виды движения шлифовального круга			Распределение оси шлифовального круга относительно координат оборудования				Форма профиля шлифовального круга			Направление движения ведущего круга
По часовой стрелки	Против часовой стрелки	Круговое	Осциллирующее	Круговое и осциллирующее	Параллельное	Смещенное в горизонтальной плоскости	Смещенное в вертикальной плоскости	Смещенное в горизонтальной и вертикальной плоскости	Цилиндрическая	Коническая	Сложная	По часовой стрелки
												Против часовой стрелки

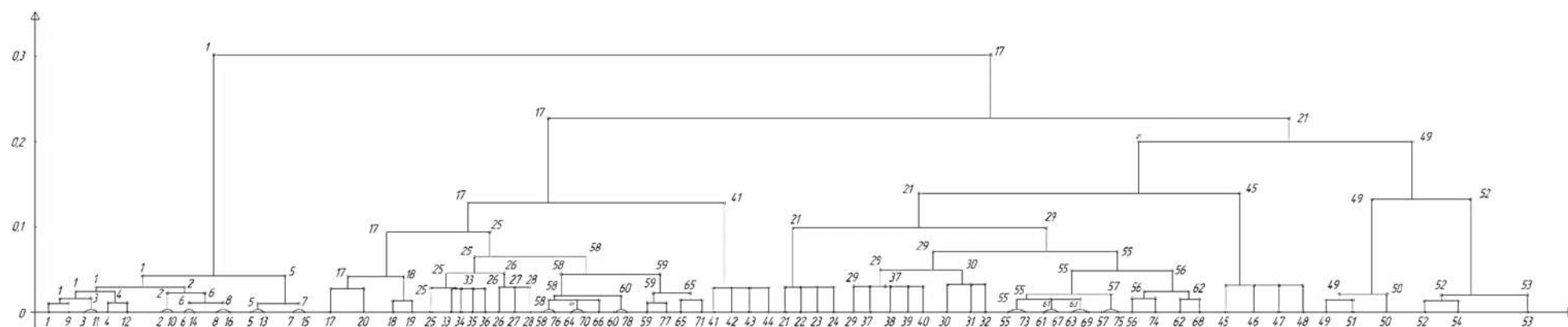
Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов												
Наличие и направление сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса												
Виды движения ведущего круга			Расположение оси ведущего круга относительно координат оборудования				Форма профиля ведущего круга			Конструкция установочных (направляющих) элементов		Относительное движение детали (к установочным (направляющим) элементам)
Круговое	Осциллирующее	Круговое и осциллирующее	Параллельное	Смещенное в горизонтальной плоскости	Смещенное в вертикальной плоскости	Смещенное в горизонтальной и вертикальной плоскости	Цилиндрическая	Коническая	Сложная	Направляющая линейка	Вращающийся ролик	Нелокальные опоры
												Отсутствует
												Поступательное
												Возвратно-поступательное

Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов													
Наличие и направление сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса													
Вращательное движение установочного (направляющего) элемента	Направление вращательного движения				Расположение оси направляющего элемента относительно координат станка				Базирование по		Базовые поверхности		
	Относительно шлифовального круга		Относительно ведущего круга										
Отсутствует	Имеется	В одну сторону	В обратную сторону	В одну сторону	В обратную сторону	Параллельное	Смещена в горизонтальной плоскости	Смещена в вертикальной плоскости	Смещена в горизонтальной и вертикальной плоскости	Обрабатываемой поверхности	Обработанной поверхности	Обрабатываемой поверхности	Обрабатываемой поверхности + торцевая

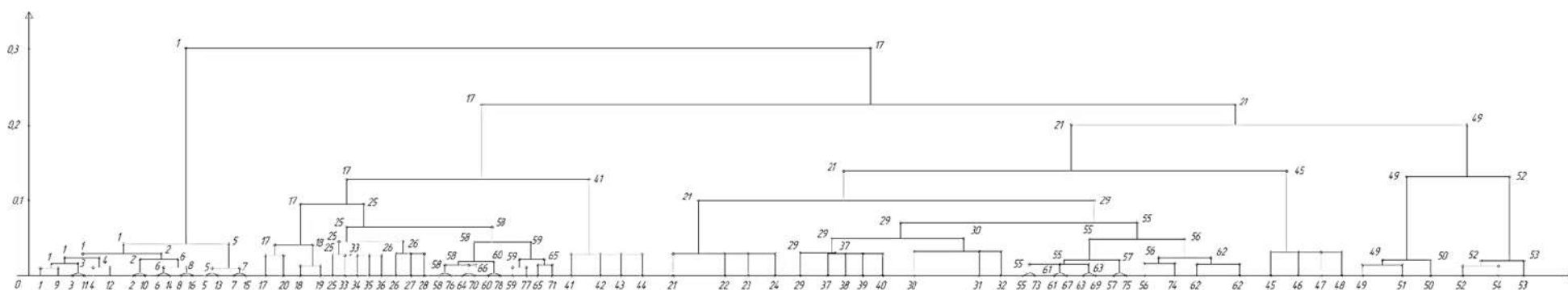
Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов													
Величины составляющих сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса													
Вид обрабатываемой поверхности							Конструкция обрабатываемой детали		Размерные характеристики обрабатываемой поверхности			Обрабатываемость материала детали	
Наружные				Внутренние									
Цилиндрическая	Конусная	Фасонная поверхность	Шаровидная	Цилиндрическая	Конусная	Сложного профиля	Простая	Сложная	Малый	Средний	Крупный	Сложно обрабатываемые	Легко обрабатываемые

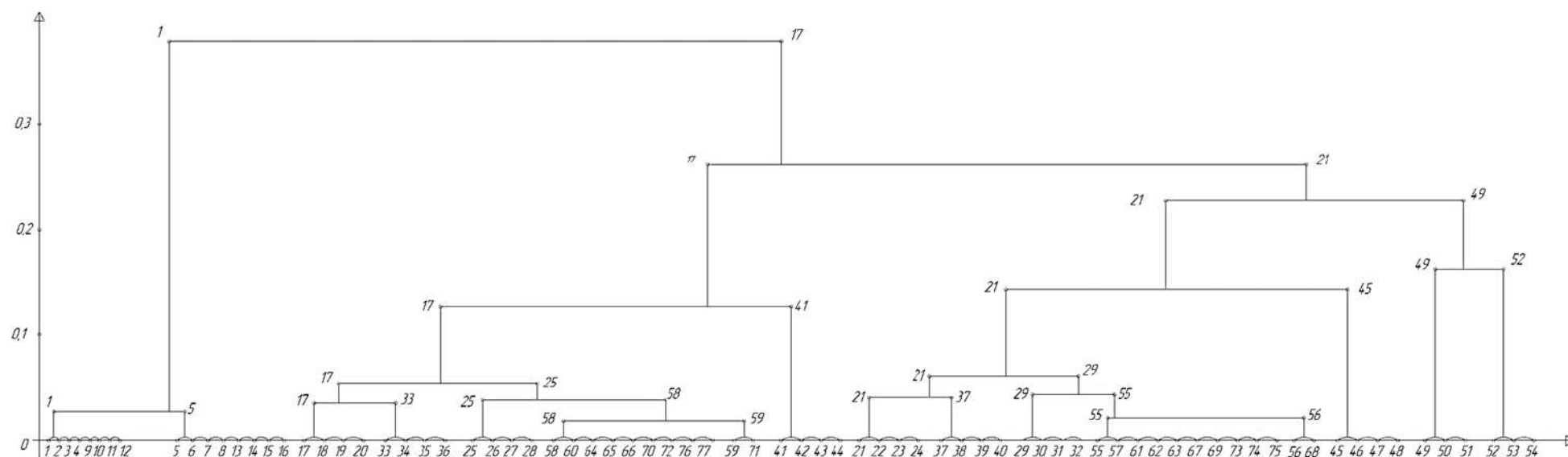
Характеристики и параметры процесса бесцентрового шлифования влияющие на выбор технологических режимов													
Величины составляющих сил возникающих в местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической оснастки процесса													
Конструктивная схема		Размерные характеристики обрабатываемой поверхности		Расположение оси шлифовального круга относительно координат оборудования				Вид обрабатываемой поверхности				Обрабатываемость материала детали	
								Наружные		Внутренние			
Расположение ведущего и шлифовального кругов в горизонтальной плоскости	Расположение ведущего и шлифовального кругов в смещенной от горизонтали плоскости	Попутное шлифование	Встречное шлифование	Параллельное	Смещена в горизонтальной плоскости	Смещена в вертикальной плоскости	Смещена в горизонтальной и вертикальной плоскости	В одну сторону	В обратную сторону	В одну сторону	В обратную сторону	Обрабатываемость поверхности	Обработанность поверхности

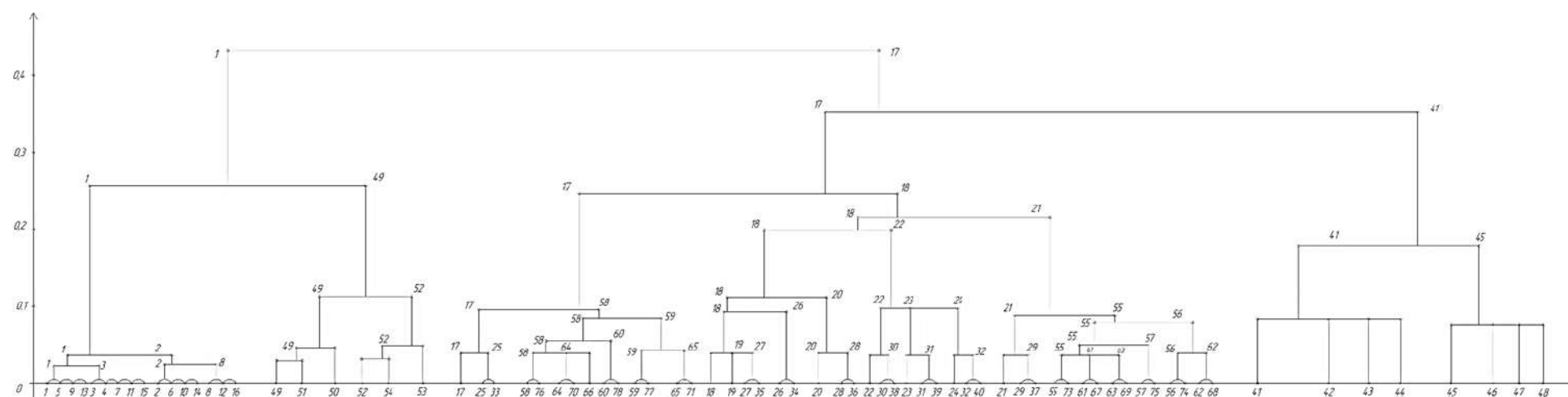
Приложение 6

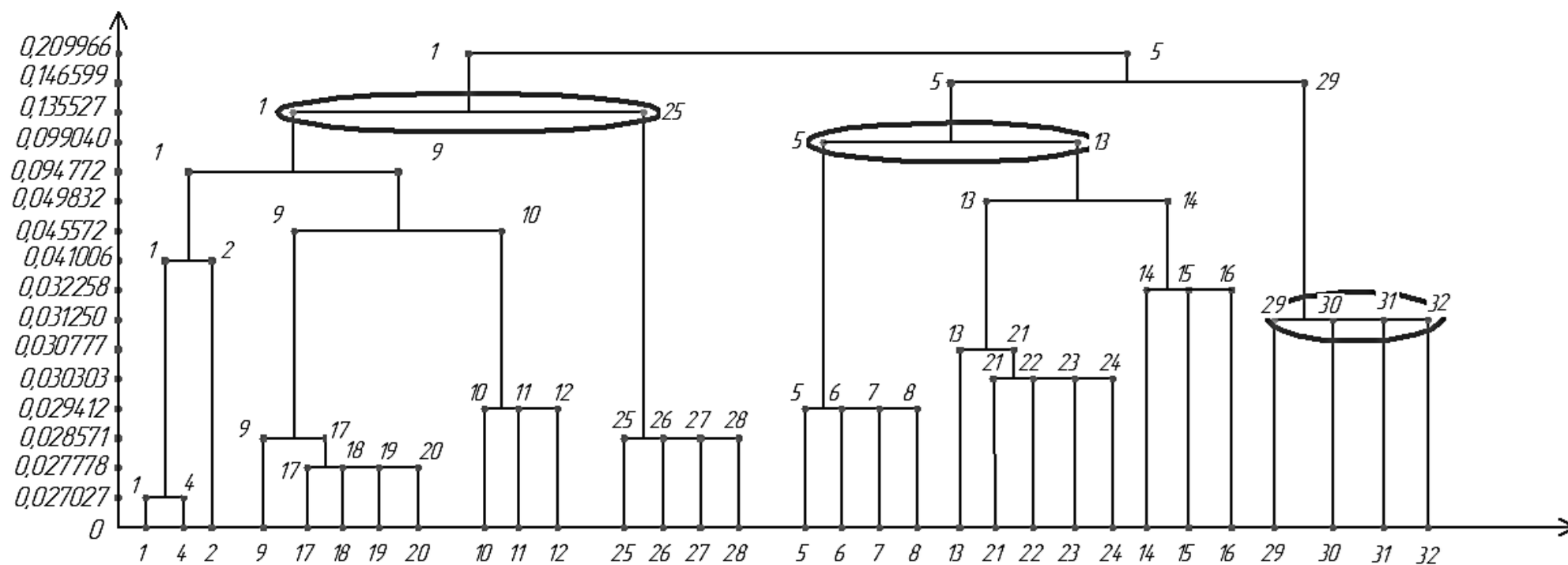


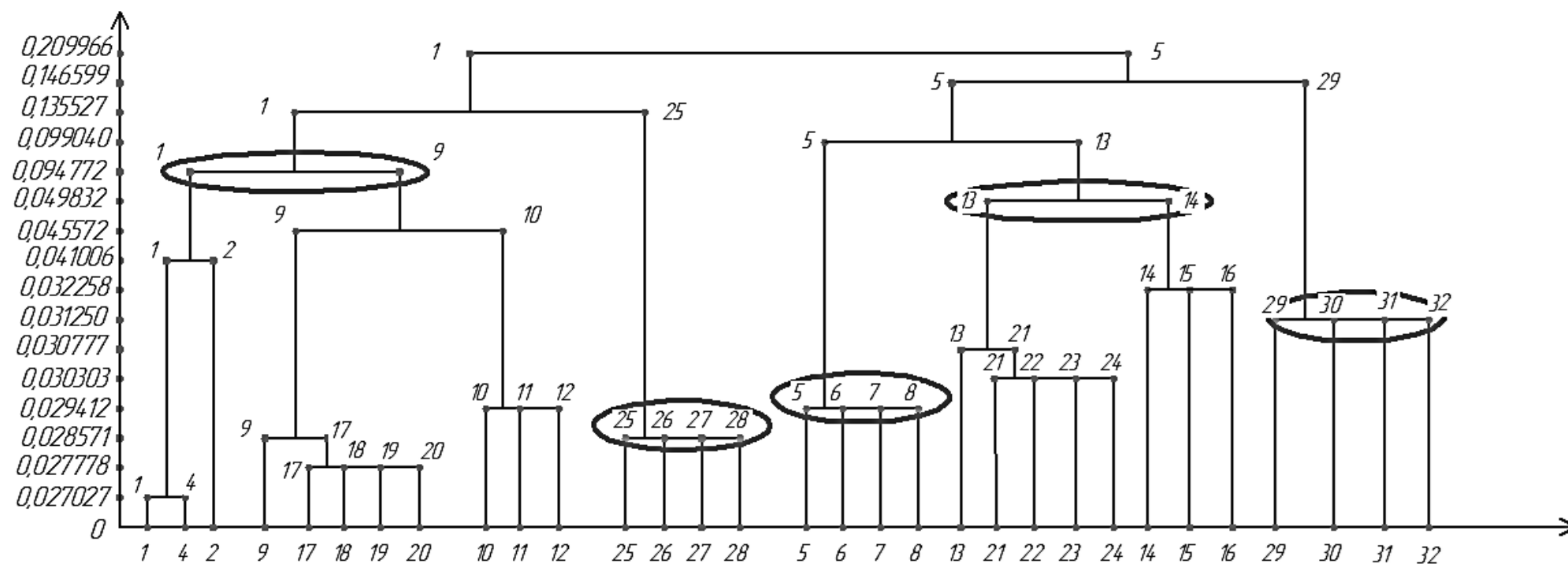
Приложение 7











19.08.2025 № 40-08/246



АКТ

об использовании в опытной эксплуатации результатов научно-исследовательской разработки «Технологическое обеспечение рациональной настройки оборудования для высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования»

Результаты научно-исследовательской работы направлены на повышение производительности и стабилизацию обеспечения качества технологических операций, выполняемых на бесцентровошлифовальных станках. Предлагаемый подход основанный на использовании в качестве наладочного параметра расстояния между центрами шлифовального и ведущего кругов и автоматизации его расчета с учетом реального состояния технологической системы, позволяет значительно снизить субъективный фактор и трудоемкость процесса наладки станка. Разработанные методические рекомендации обеспечивают выполнение проверки соблюдения требования силового замыкания и проведение анализа изменения составляющих сил резания во всем пространстве рабочей зоны обработки.

Тестовые расчеты на основе данных для технологических операций, выполняемых на станках моделей RC-18, 3Д180 подтвердили работоспособность и эффективность созданных моделей и программного обеспечения. Для проведения опытной эксплуатации переданы программные средства PRNR1 и PRNR2, отличающиеся вводом исходных данных по высоте установки оси детали над линией центров кругов для адаптации к применяемым на конкретном рабочем месте подходам к процедуре наладки оборудования.

Проведено методическое инструктивное совещание с инженерно-техническим персоналом и наладчиками по вопросам использования разработанных программных средств, переданы инструктивные рекомендации по проведению их опытной эксплуатации, ориентированные на использования в производственных условиях АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко».

Работа выполнена в порядке инициативы в рамках диссертационной работы Малинина П.В. (научный руководитель Бочкарев П.Ю.).

Зам главного инженера
по развитию предприятия, к.т.н

Стешкин А.В.

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор АО «НПП «Алмаз»

19.08.2015 Апин М.П.

АКТ

Внедрение в опытную эксплуатацию результатов научно-исследовательской разработки
«Технологическое обеспечение рациональной настройки оборудования для
высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования»

Разработка предназначена для повышения производительности технологических операций, выполняемых на бесцентровошлифовальных станках в условиях многономенклатурного производства, а именно снижения трудоемкости наладки за счет автоматизации расчета и обоснования предложенных настроечных параметров.

Разработка представляет программный модуль численного определения настроечного параметра с учетом реального состояния оборудования и средств технологического оснащения. В качестве определения наладочного параметра выполнения операций проходного бесцентрового шлифования предложено расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов, позволяющее снизить субъективный фактор проведения процесса наладки и обеспечить стабильность качества выполнения обработки за счет соблюдения условия силового замыкания во всех сечениях рабочей зоны обработки.

Тестовые сравнения расчетных данных и результатов, по которым определялась трудоемкость наладки по нормативным материалам и хронометража отдельных элементов процесса наладки в производстве бесцентровых шлифовальных станков 3A130, 3B182, 125 (JAINNHER), Koenig and Bauer, показал снижение времени настройки не менее 30 % в зависимости от оборудования и технологического процесса.

Проведено методическое инструктивное совещание с инженерно-техническим персоналом и наладчиками по вопросам использования программного модуля применительно к условиям производства АО «НПП «Алмаз».

Работа выполнена в порядке инициативы в рамках диссертационной работы
Малинина П.В. (научный руководитель Бочкарев П.Ю.)

От АО «НПП «Алмаз»

Главный инженер НПП «Электронные системы»

Погодаев А.В.

От ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Профессор кафедры «Технология машиностроения» КТИ

П.Ю. Бочкарев
Аспирант

П.В. Малинин

УТВЕРЖДАЮ
Директор Камышинского технологического
института (филиал)
ФГБОУ ВО «Волгоградский
государственный технический
университет»
к.э.н., доцент



А. Н. Хаценко

Акт

об использовании результатов научно-исследовательской работы в образовательной
деятельности

Разработка Камышинского технологического института «Технологическое обеспечение рациональной настройки оборудования для высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования», выполненная аспирантом кафедры «Технология машиностроения» Малиным Павлом Витальевичем, используется в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при изучении дисциплин «Основы технологии машиностроения», «Автоматизация производственных процессов», «Технология машиностроения», «Основы научных исследований».

Использованы следующие материалы диссертации:

- принципы группирования методов бесцентрового шлифования с использованием аппарата кластерного анализа;
- методические рекомендации по наладке операций проходного бесцентрового шлифования;
- расчетные зависимости выполнения требования силового замыкания при обработке в рабочей зоне станка;
- схемы составляющих сил местах контакта обрабатываемой поверхности с элементами станочной системы;
- составление размерных технологических цепей, учитывающих реальное состояние шлифовального и ведущего кругов, схемы базирования;
- автоматизированные подсистемы проектных процедур технологической подготовки операций проходного бесцентрового шлифования («Программа для расчета уровней иерархии при кластерном анализе способов бесцентрового шлифования»; «Программа определения мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами оборудования при проходном бесцентровом шлифовании»; «Программа расчета наладочных параметров операций наружного проходного бесцентрового шлифования»).

Заведующий кафедрой «Технология
машиностроения»

А.А. Вирт

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023610672

**Программа для расчета уровней иерархии при
кластерном анализе способов бесцентрового
шлифования**

Правообладатель: **Общество с ограниченной
ответственностью «Научно-производственное
объединение национальные технологические системы и
комплексы» (RU)**

Авторы: **Малинин Павел Витальевич (RU), Бочкарев Петр
Юрьевич (RU), Шалунов Вячеслав Викторович (RU)**

Заявка № 2022685957

Дата поступления 25 декабря 2022 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 12 января 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024617977

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ**

Номер регистрации (свидетельства): 2024617977 Дата регистрации: 08.04.2024 Номер и дата поступления заявки: 2024617146 08.04.2024 Дата публикации и номер бюллетеня: 08.04.2024 Бюл. № 4	Автор(ы): Малинин Павел Витальевич (RU), Бочкарев Петр Юрьевич (RU) Правообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (RU)
--	--

Название программы для ЭВМ:
Программа расчета наладочных параметров операций наружного проходного бесцентрового шлифования

Реферат:

Программа предназначена для снижения трудоемкости и повышения качества наладки операций наружного проходного бесцентрового шлифования. В качестве исходных данных вводятся: диаметры шлифовального и ведущего кругов, размер обрабатываемой поверхности, диапазон справочных высот между осью детали и горизонтальной плоскостью центров кругов. Формализованная модель включает разработанные модели определения мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы при наладке и расстояние между центрами шлифовального и ведущего кругов, на основании которых определяются наладочные параметры. Программа позволяет провести проверку условий расположения точек контакта для соблюдения требования силового замыкания с возможностью варьирования угла наклона установочного опорного ножа. Область применения – технологическое обеспечение механообрабатывающих машиностроительных производств.

Язык программирования: C++
 Объем программы для ЭВМ: 2,1 Кб

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



RU2024617988

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
ГОСУДАРСТВЕННАЯ РЕГИСТРАЦИЯ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ

Номер регистрации (свидетельства):
2024617988
Дата регистрации: 08.04.2024
Номер и дата поступления заявки:
2024617154 08.04.2024
Дата публикации и номер бюллетеня:
08.04.2024 Бюл. № 4

Автор(ы):
Малинин Павел Витальевич (RU),
Бочкарев Петр Юрьевич (RU)
Правообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Волгоградский государственный
технический университет» (RU)

Название программы для ЭВМ:
Программа определения мест контакта обрабатываемой поверхности с элементами оборудования при проходном бесцентровом шлифовании

Реферат:
Программа предназначена для обеспечения качества и повышения производительности операций проходного бесцентрового шлифования. Исходными данными являются размерные характеристики шлифовального и ведущего кругов, обрабатываемой поверхности, угол наклона установочного опорного ножа, угол наклона ведущего круга в вертикальной плоскости. Программа позволяет на основе разработанных формализованных моделей выполнить расчет размерных связей между обрабатываемой поверхностью, кругами и опорным ножом во всем рабочем пространстве зоны обработки. Предусмотрен анализ выполнения соблюдения требования силового замыкания при обработке с возможностью корректировки назначения рекомендованных справочных высот между осью детали и горизонтальной плоскостью центров кругов при наладке технологической операции. Область применения: технологическое обеспечение механообрабатывающих машиностроительных производств

Язык программирования: C++
Объем программы для ЭВМ: 3 Кб