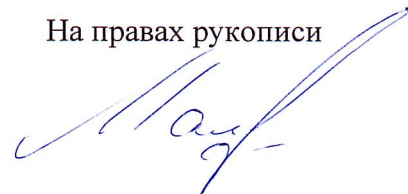


На правах рукописи



Малинин Павел Витальевич

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

2.5.6. Технология машиностроения
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград - 2025

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения»
Камышинского технологического института (филиала)
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет».

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор,
БОЧКАРЕВ Петр Юрьевич.

Официальные оппоненты:

ТАМАРКИН Михаил Аркадьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» (г. Ростов-на-Дону),
кафедра «Технология машиностроения»,
заведующий;

ИЛЬИНЫХ Андрей Степанович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет путей сообщения» (г. Новосибирск),
кафедра «Технология транспортного
машиностроения и эксплуатации машин»,
профессор.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный
университет» (г. Пенза).

Защита состоится «18» декабря 2025 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета 99.2.072.02, созданного на базе Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. и Волгоградского государственного технического университета по адресу 400005, г. Волгоград, пр-т. Ленина, д.28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет и на сайте <http://www.vstu.ru> по ссылке <https://www.vstu.ru/upload/iblock/36f/36f3052ae46b6dd7de2720021944ff25.pdf>

Автореферат разослан « » октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Родионов Игорь Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Одним 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 деталей, имеющих форму цилиндра, бесцентрово-шлифовальная методика является наиболее перспективной и прогрессивной. 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. Одним из основных факторов, ограничивающих область применения этого метода обработки, является сложность настройки и доводки оборудования; это связано с отсутствием формализованных процедур. Ввиду данного фактора, возникает зависимость уровня квалификации и опыта оператора станка с эффективностью работы оборудования и качеством получаемых изделий. Это добавляет субъективный фактор не только в результат выполнения данной операции, но и во всю организацию производственного процесса. В настоящее время отсутствует понимание обеспечения относительного движения детали, которое напрямую связано с определением силовых воздействий, возникающих между элементами системы станка на всей протяженности рабочей зоны обработки, что является ключевой задачей, требующей проведения исследования. В результате отсутствия решения данной задачи, применение бесцентрового шлифования ограничено применением только в условиях массового и крупносерийного производства за счет высоких временных затрат, значительной трудоемкостью при настройке и управлении процессом 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

Теоретические и методические вопросы технологии бесцентрового шлифования на протяжении десятилетий являлись предметом исследований многих отечественных и зарубежных учёных. В работах Я.М. Ашкиназия, Б.М. Бржозовского, Б.И. Черпакова, В.И. Муцянка, А.Ф. Прохорова, В.И. Слонимского и других были заложены основы понимания кинематики процесса, закономерностей формирования качества обрабатываемых поверхностей, вопросы проектирования оборудования и выбора режимов обработки. Вместе с тем в проведённых исследованиях отсутствует целостный подход к формализации проектных процедур наладки в зависимости от реального состояния технологической системы и конструктивных особенностей оборудования. Несмотря на наличие развитой научной базы в области бесцентрового шлифования, вопросы рационализации и автоматизации наладочных процедур для операций проходного типа остаются недостаточно исследованными и требуют дальнейшего целенаправленного развития.

Объект исследования - операции проходного бесцентрового шлифования.

Предмет исследования – проектные процедуры назначения технологических параметров наладки и реализации операций проходного бесцентрового шлифования.

Целью работы является повышение производительности обработки заготовок методом проходного бесцентрового шлифования с учетом обеспечения стабильности параметров качества обрабатываемых поверхностей за счет рациональной наладки оборудования.

Задачи работы

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 устанавливающих, 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 влияние 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, устанавливающего 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 условиях действующих производственных комплексов подтвердили возможность применения созданных методических материалов на машиностроительных предприятиях. Их использование позволило снизить трудоемкость наладки не менее чем на 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 теории планирования экспериментов. При проведении работ применялись современные средства и методы оценки качественных параметров деталей, используемых в действующих производствах.

Положения, выносимые на защиту:

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.

1. 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.

2. Подход к назначению перечня и формализованному расчету наладочных параметров операций проходного бесцентрового шлифования, установлению последовательности выполнения наладочных манипуляций, снижающих долю субъективных составляющих в процессе принятия решений при настройке технологической системы.

3. Метод определения пространственного расположения мест контактов обрабатываемой поверхности с элементами технологической системы, включающий описанные зависимости, устанавливающий взаимосвязь между ними с учетом конкретных условий обработки.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

По результатам проведения апробации теоретических и экспериментальных исследований в условиях действующих производств, приняты решения и получены акты о внедрении в опытную эксплуатацию результатов работы на АО «НПП Алмаз», АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко». Также принято решение об использовании результатов работы в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

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). Наукоемкие технологии в машиностроении. 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.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 32 печатных работах, из них 12 – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и семнадцати приложений. Объем работы изложен на 197 страницах машинописного текста, включает 55 рисунков и 16 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель исследований, приведены научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлена хронологическая последовательность развития научно-технических знаний в области бесцентрового шлифования. Отмечен вклад ученых: Я.М. Ашкиназия, Б.М. Бржозовского, Б.И. Черпакова, В.Н. Масленникова, В.И. Муцяно, А.Ф.

Прохорова, В.И. Слонимского, М.А. Тамаркина, Е.С. Киселева, В.М. Шумячера, Д.Г. Евсеева, Т. Н. Ивановой, Л.В. Худобина, З.И. Кремня.

Проведен анализ известных литературных данных и исследования современного состояния технологической подготовки операций бесцентрового шлифования, использования методических материалов по способам наладки оборудования и назначения технологических режимов. Проведённое анкетирование работников технологических служб на предприятиях Поволжского региона (Саратовской, Волгоградской и Пензенской областей) показало, что в настоящее время отсутствует единый методический подход к технологическому обеспечению операций бесцентрового шлифования, возможность принятия проектных решений на этапе наладки оборудования выполняется без учета реального состояния средств технологического оснащения и носит преимущественно субъективный характер.

По результатам проведенного обзора работ ученых и практиков поставлена задача разработать формализованные модели технологического обеспечения выполнения рациональной настройки оборудования для высокопроизводительного проходного бесцентрового шлифования, направленные на создание автоматизированных систем проектирования и реализации операций.

Во второй главе 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, сформированы группы способов проходного бесцентрового шлифования, объединенных по критерию однородности проектных процедур при выполнении их технологической подготовки. Данный подход принципиально отличается от известных направлений исследований в данной области.

Определена для исследования, как наиболее используемая в действующих производствах, группа методов обработки (рисунок 1) имеющих следующие характеристики: 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.

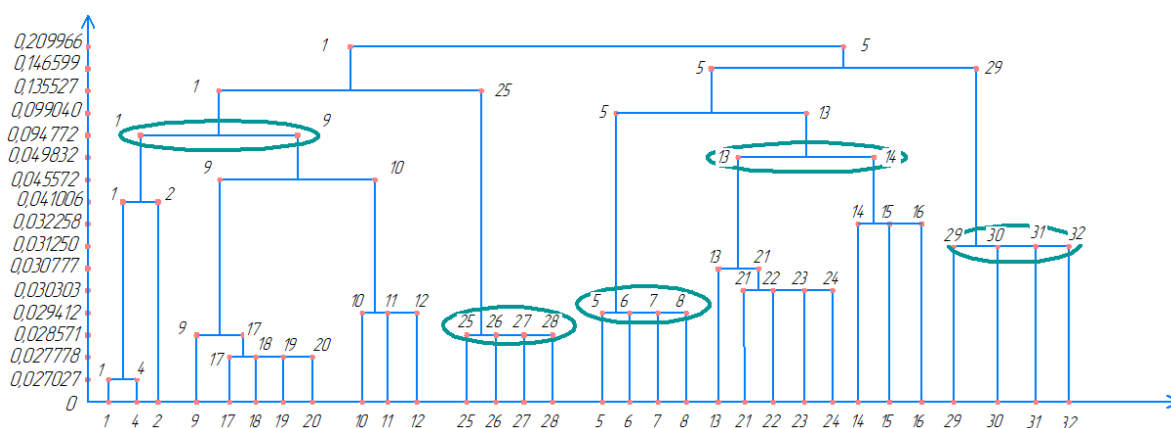


Рисунок 1 Дендрограмма групп способов проходного бесцентрового шлифования

Для снижения трудоемкости выполнения процесса наладки проведены исследования, позволяющие развить известные теоретические методы. Выведены зависимости и разработаны модели определения наладочных параметров с учетом реальных размерных характеристик шлифовальных и ведущих кругов, размеров заготовок. В качестве наладочного параметра предложено расстояние между центрами

шлифовального и ведущего кругов в сечении, в котором выполняется наладка (оси кругов расположены в одной горизонтальной плоскости), при этом их регулирование возможно с использованием рабочих органов оборудования, что повышает объективность качества выполнения работ и сокращает трудоемкость процедуры наладки оборудования.

Получены зависимости, устанавливающие 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 во всех сечениях рабочей зоны обработки (рисунок 2).

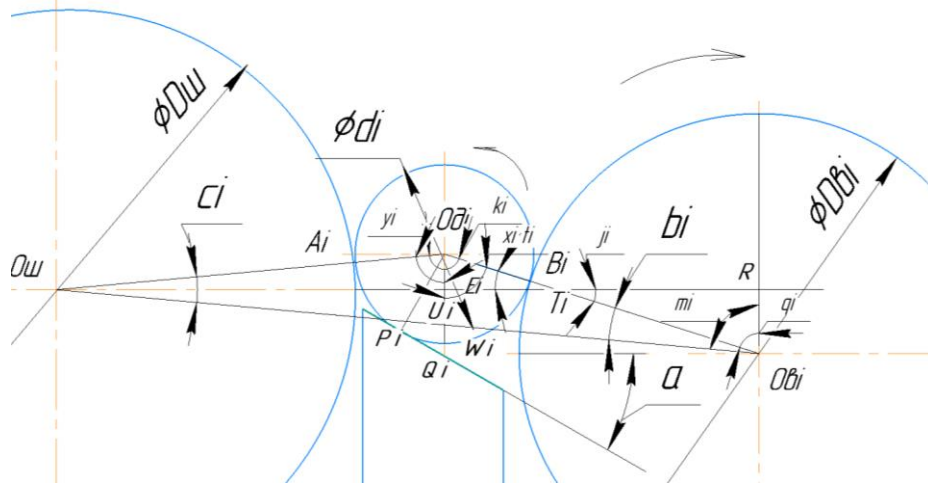


Рисунок 2 Схема проходного бесцентрового шлифования в *i*-м сечении рабочей зоны обработки

Созданы модели, позволяющие установить размерные и угловые значения динамически изменяющихся связей для отдельных рабочих зон обработки, расположение мест контакта поверхности заготовки со шлифовальным, ведущим кругами и опорной поверхностью ножа определяющих пространственное расположение мест 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.

$$|O_{ш} O_{дi}| = \sqrt{\left(\frac{D_{ш} + d_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{ш} + d_i}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) \cdot \cos ci} \quad (1)$$

$$\cos ci = \frac{|O_{вi} O_{дi}|^2}{\left(\frac{D_{ш} + d_i}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{D_{ш} + d_i}{2}\right) \cdot \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right)} \quad (2)$$

$$gi^\circ = \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш} + D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2} - \frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u}{|O_{ш} O_{дi}|^2} \quad (3)$$

$$\cos^{-1} \frac{\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \left(\frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)}{\left(\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)} \quad (4)$$

$$ji^\circ = 90^\circ - \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш} + D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2} - \frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u}{|O_{ш} O_{дi}|^2} \quad (4)$$

$$\cos^{-1} \frac{\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \left(\frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)}{\left(\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right)\right)^2 + \left(\frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)^2 - \left(\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{L_i}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{вi} + d_i}{2}\right)}$$

$$xi^\circ = \cos^{-1} \frac{\sqrt{\left(\frac{D_{ш} + D_{д}}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + D_{д}}{2} \cdot \cos b\right)^2 + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right)^2}}{\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u} \quad (5)$$

$$\cos^{-1} \frac{\left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \left(\frac{D_{вi} + di}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{ш} + d}{2} \cdot \cos c + \frac{D_{в} + d}{2} \cdot \cos b\right) + \left(\frac{Li}{\cos u} \cdot \sin u\right) + \frac{D_{вi} + di}{2}}{|O_{ш} O_{дi}|^2} \quad (6)$$

$$\text{угол } \angle O_{ш} O_{дi} U - ci^\circ; \quad (7)$$

$$|O_{дi} Ui| = \frac{|O_{ш} O_{дi}|}{\sin zi^\circ} \cdot \sin ci^\circ. \quad (8)$$

Созданные модели расширяют существующие подходы к формализованному назначению наладочных параметров бесцентрово-шлифовального оборудования, они затрагивают аспекты, связанные с установлением пространственно-размерных связей между элементами технологической системы, расширяют возможности учёта факторов, влияющих на качество обработки, обеспечивают автоматизацию и интеллектуализацию всех проектных процедур на данном этапе технологической подготовки.

На основе этой информации создана математическая модель, позволяющая объективно оценить качество настройки в части обеспечения условия силового замыкания, что является одним из ключевых факторов обеспечения качества выполнения операций. При этом с целью учета установленного неравномерного распределения припуска в зонах обработки выведены зависимости для определения величин, составляющих припуска в отдельных секторах рабочей зоны обработки.

Качественное и эффективное выполнение технологических операций невозможно без полного комплексного учета влияющих факторов на всех стадиях их проектирования и реализации. Разработанный метод включает изучение составляющих сил, действующих в местах соприкосновения обрабатываемой детали с компонентами технологической системы, что позволило выявить зависимости между этими силами и разработать комплекс формализованных моделей, которые описывают влияние различных факторов на качество и технико-экономические показатели процесса проходного бесцентрового шлифования.

Полученные аналитические результаты обобщены в систему уравнений и неравенств, которые устанавливают причинно-следственные связи между технологическими параметрами обработки и факторами, оказывающими значительное влияние на условия выполнения операций проходного бесцентрового шлифования. Для описания обобщенной модели силовых схем при проходном бесцентровом шлифовании приведена детализация составляющих сил, возникающих в процессе реализации проходного бесцентрового шлифования. Представлен пример для нормальных и тангенциальных составляющих сил в i -ом сечении рабочей зоны обработки:

$$\left\{ \begin{array}{l} FA_{in}x = FA_{in} \cdot \cos(90^\circ - y_i^\circ), FA_{in}y = FA_{in} \cdot \sin(90^\circ - y_i^\circ) \\ FB_{in}x = FB_{in} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{in}y = FB_{in} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\ FP_{in}x = F_{nPi} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ), FP_{in}y = F_{Pi} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ) \\ FP_{it}x = F_{PiT} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ), FP_{ity} = F_{PiT} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ) \\ FB_{it}x = FB_{iT} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{ity} = FB_{iT} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\ FB_{itp}x = FB_{itp} \cdot \cos(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)), FB_{itp}y = FB_{itp} \cdot \sin(b_i^\circ + (90^\circ - m_i^\circ)) \\ FP_{itp}x = FP_{itp} \cdot \cos(90^\circ - a^\circ), FP_{itp}y = FP_{itp} \cdot \sin(90^\circ - a^\circ) \\ F_{ipTy} = F_{pT} \cdot \cos(\beta^\circ - ((90^\circ - y_i^\circ))), F_{ipTx} = F_{pT} \cdot \sin(\beta^\circ - ((90^\circ - y_i^\circ))) \\ F_{ipTp}y = F_{pTp} \cdot \sin((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ), F_{ipTp}x = F_{pTp} \cdot \cos((90^\circ - y_i^\circ) + \varphi_s^\circ) \\ F_{ipин}y = F_{пин} \cdot \cos(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)), F_{ipин}x = F_{пин} \cdot \sin(\beta^\circ + \gamma^\circ - (90^\circ - y_i^\circ)) \end{array} \right. \quad (9)$$

В качестве методического подхода для расчета силового взаимодействия в месте контакта шлифовального круга с поверхностью детали использовались известные

результаты исследований, основанные на изучении микрорезания единичными зернами с учетом влияния сопротивления материала обрабатываемой поверхности процессам пластического деформирования и трения.

При описании проектной процедуры назначения технологических режимов обработки использовались известные в научно-технической литературе зависимости, устанавливающие связь между силами резания и режимами абразивной обработки и позволившие сформировать модель для определения параметров режимов обработки методом проходного бесцентрового шлифования с учетом силовых схем взаимодействия заготовки и оборудования.

На основе полученных моделей разработаны методические рекомендации по назначению технологических режимов для сформированного кластера операций проходного бесцентрового шлифования.

В третьей главе

Для проверки работоспособности разработанных моделей создана методика проведения экспериментальных исследований. Проведение экспериментальной части работы включало проверку полученных теоретических результатов в условиях действующих производственных систем (АО «НПП АЛМАЗ», АО «ЕПК Саратов», АО «ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко») на оборудовании (ЗВ182, JHC – 125 (JAINNHER), 3A130, KOENIG&BAUER / HAHN&KOLB, SASL 200*500 A, SASL5/AD, SASL 125, и др.)

Представлено алгоритмическое описание проектных процедур: по расчету технологических параметров в сечениях рабочей зоны на операциях проходного бесцентрового шлифования; расчет составляющих величины припуска; определение соответствия требования условию силового замыкания, обеспечивающих наряду с другими созданными средствами автоматизации проектных процедур сокращение трудоемкости наладок и обеспечение стабильности параметров качества обрабатываемых деталей.

В четвертой главе представлены результаты проведенных промышленных экспериментов и апробации работы.

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). Представлены графики значений технологических параметров в различных сечениях рабочей зоны обработки и их взаимовлияние. На рисунке 3 представлены результаты экспериментальных исследований взаимовлияния $O_{шОвi}$ (расстояния между центром шлифовального и центром ведущего круга в i -ом сечении) $O_{диUi}$ (расстояния между центром заготовки и линией между центрами кругов в i -м сечении) и L_i (расстояния i -го сечения от сечения в котором выполняется наладка).

Результаты экспериментальных исследований подтвердили работоспособность созданных моделей расчета наладочных параметров. С целью удовлетворения предложений инженерно-технического персонала предприятия, для наглядного представления результатов разработаны удобные формы занесения исходных данных о реальном состоянии технологической системы (рисунок 4).

Использование разработанных методических подходов и программного обеспечения процесса настройки позволило снизить в среднем время, затрачиваемое на следующие процедуры: установку 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%.

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».

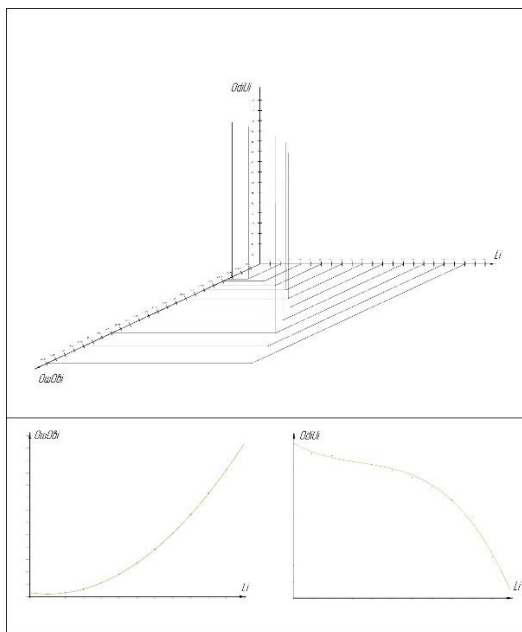


Рисунок 3 Результаты экспериментальных исследований взаимодействия между ОшОви, ОдUi, и Li.

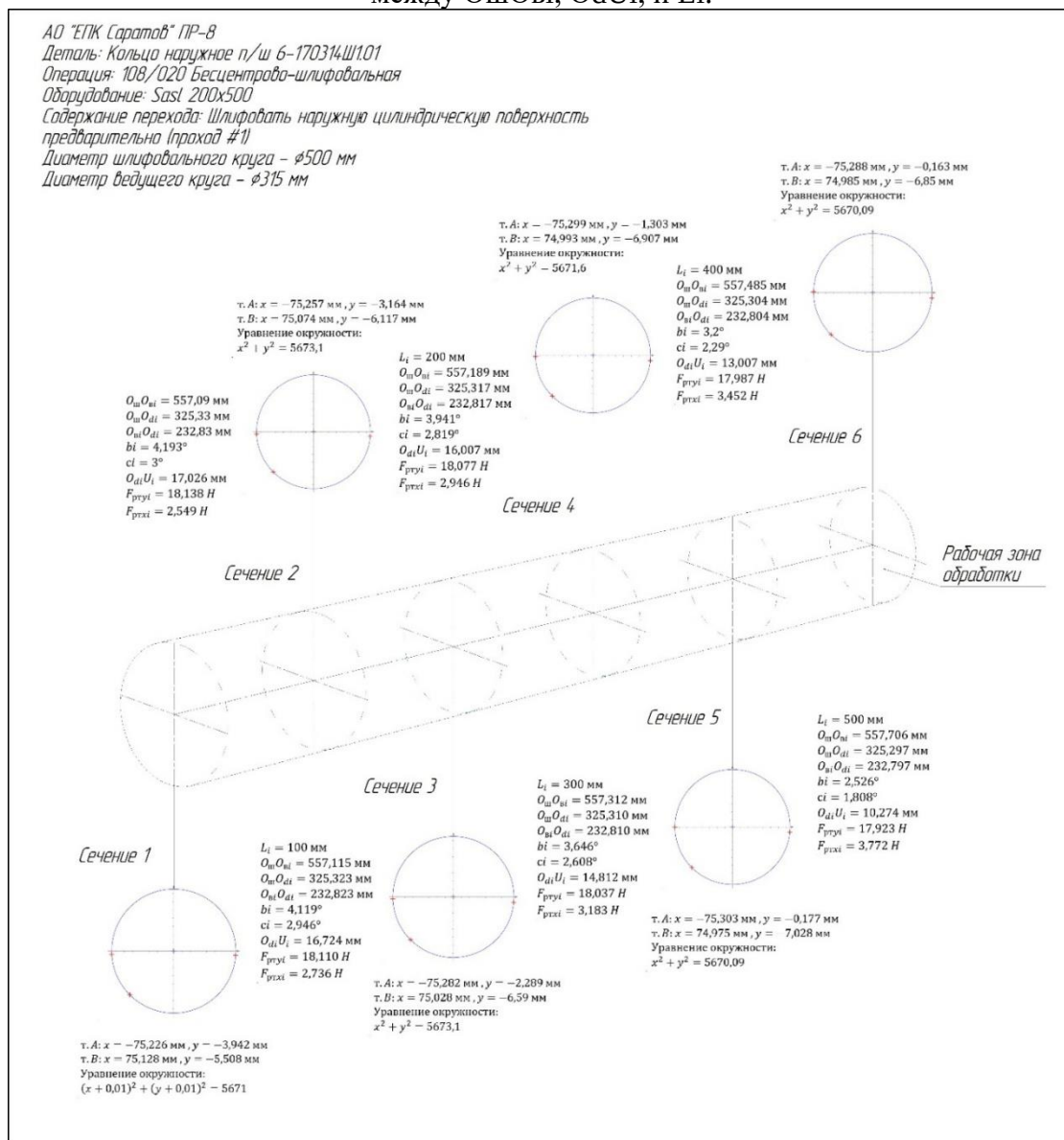


Рисунок 4 Значение параметров в рабочей зоне обработки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. 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.
2. Систематизированы результаты анализа производственного опыта по практическому использованию существующих нормативно-справочных и методических рекомендаций на действующих предприятиях.
3. Сформирована структурированная база данных способов бесцентрового шлифования по конструкторско-технологическим возможностям и компоновочным схемам используемого оборудования и средств технического оснащения.
4. 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 множество способов для разработки типовых систем проектирования и реализации технологических процессов.
5. 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.
6. Разработаны формализованные модели и методика, расчета параметров наладки технологических операций проходного бесцентрового шлифования в условиях производства, повышающая объективность и снижающая трудоемкость настройки технологических систем.
7. Установлено неравномерное распределение величины припуска в рабочей зоне обработки, создана модель для определения составляющих припуска для отдельных секторов в сечениях рабочей зоны.
8. Выполнен поэлементный расчет составляющих сил, возникающих в процессе реализации технологических операций и рекомендации по выбору режимов обработки на основе известных ограничений.
9. 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.
10. 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.
11. Проведенная апробация теоретических исследований в условиях действующих производств подтвердила 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.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований

Перспективы дальнейшей разработки темы связаны с расширением созданных моделей на иные разновидности бесцентрового шлифования, включая врезное и комбинированное, а также на сопряжённые процессы высокоточной абразивной обработки. Научно-практический интерес представляет интеграция предложенных моделей в цифровые двойники технологических систем бесцентрового шлифования, которая обеспечит объединение моделирования, мониторинга и управления в единой информационно-аналитической среде, что позволит существенно повысить эффективность и универсальность операций бесцентрового шлифования, а также расширить области их практического применения в современной промышленности.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. 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 EVCSEE.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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 RGJMX.

11. 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. – С. 117-131. – DOI 10.21685/2072-3059-2025-1-10.

12. Методический подход к определению составляющих сил при проходном бесцентровом шлифовании / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев, И. И. Артемов, Г.А. Гончарова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2025. – № 2. – С. 110-125. – DOI 10.21685/2072-3059-2025-2-10.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

1. 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.

2. 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.

3. 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 WZRFA.

Публикации в других изданиях

1. 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.

2. 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.

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

4. 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.

5. 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.
6. 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.
7. Малинин, П. В. Анализ способа продольного шлифования на бесцентровых круглошлифовальных 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Совершенствование обработки на бесцентровошлифовальных 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.

14. Развитие бесцентровошлифовальной 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.

15. 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. – Р. 171-172. – EDN ZZIJZE.

16. Малинин, П. В. Повышение эффективности технологической подготовки механообрабатывающего производства в условиях цифровой экономики / П. В. Малинин, П. Ю. Бочкарев // Доступность банковских и иных финансовых услуг как правовой принцип эффективного функционирования публичных и частных финансов : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции, Саратов, 01 июня 2017 года / Под редакцией Е.В. Покачаловой. – Саратов: Саратовская государственная юридическая академия, 2019. – С. 83-85. – EDN EKLRNF.

17. 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.

Подписано в печать 2025 г. Заказ № . Тираж экз.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Times. Печать офсетная.

Усл. печ. л..

Отпечатано в типографии

Издательства ВолГТУ

400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корпус 7