

На правах рукописи



Мирзомахмудов Азимжон Рустамович

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СБОРНЫХ ФРЕЗ СО СМЕННЫМИ
МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ КОЛЕСНЫХ ПЛАТФОРМ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре инструментальной техники и технологии формообразования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Научный руководитель	Исаев Александр Вячеславович кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инструментальной техники и технологии формообразования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва
Официальные оппоненты	Попов Андрей Юрьевич доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск Штин Антон Сергеевич кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры станков и инструментов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень
Ведущая организация	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Защита состоится «___» _____ 2026 г. в ___:___ на заседании диссертационного совета 24.2.332.01, при ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» по адресу: 127055, Москва, Вадковский пер., д. 1. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/mirzomakhmudov-azimzhon-rustamovich/index.php>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направить в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.

Е.С. Сотова

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В машиностроении важна обработка деталей сложного профиля, включая элементы мобильных колесных платформ: колесные пары подвижного состава, ходовые системы, головки рельсов и острия стрелочных переводов. Эти элементы подвержены износу и требуют регулярного восстановления с соблюдением высокой точности и качества. Стойкость режущего инструмента напрямую определяет стабильность и производительность процесса обработки, а также затраты на восстановление инструмента. Перспективным направлением является использование сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами (СМП) для восстановления профиля катания колесных пар и других фасонных поверхностей деталей мобильных колесных платформ. Такие инструменты отличаются высокой производительностью и ремонтпригодностью. Однако при обработке в условиях неравномерного припуска и переменной твердости материала ключевой задачей становится обеспечение долговечности инструмента. Существующие конструкции сборных фасонных фрез с СМП нередко ограничены низкой стойкостью из-за нерационального распределения нагрузок на режущие кромки и неравномерного износа пластин. Разработка новых конструкций сборных фрез с СМП позволит повысить стойкость, сократить затраты на переналадку, снизить расход пластин и повысить эффективность восстановления фасонных деталей мобильных колесных платформ.

Степень разработанности темы. Вопросы повышения стойкости сборных фрез с СМП рассматривались в исследованиях, посвященных оптимизации геометрии режущих кромок, ориентации и расположения пластин, обеспечению равномерности процесса резания и снижению износа инструмента. Этими направлениями занимались Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Исаев А.В., Куликов М.Ю., Чулин И.В., Шитиков А.Н., Чевычелов С.А., Лукина С.В., Веселов А.И., Бобрышев Д.А., Гладышкин А.О., Евсеев Д.Д., Борисов С.В., Плавник С.Л., а также зарубежные исследователи, включая Filipowicz K., Ghionea I.G., Śladkowski A. и других. Кроме того, значительный вклад в разработку методик оценки износостойкости конструкционных и инструментальных материалов, анализ условий нагружения и износа рабочих поверхностей колес и рельсов внесли Попов А.Ю., Бунькова Т.Г., Терехов П.М., Бисерикан М.И., Либерман Я.Л., Воробьев А.А., Сан Маунг, а также зарубежные исследователи Corral E., Meneses J. и другие. Несмотря на накопленный опыт применения сборных фрез с СМП, остаются нерешенными задачи обеспечения высокой стойкости инструмента при обработке фасонных участков изношенных деталей, что определяет необходимость исследований, направленных на создание новых конструкций фрез и способов их применения для повышения эффективности обработки фасонных поверхностей в машиностроении.

Целью работы является повышение стойкости режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей деталей мобильных колесных платформ

за счет разработки конструкции сборной фрезы со сменными многогранными пластинами и способа ее применения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования:**

1. Анализ технических требований к обработке изделий, имеющих фасонные профили с прямолинейной направляющей и деталей типа тел вращения, обрабатываемых сборными фрезами с СМП, токарными резцами с СМП и шлифовальными кругами;

2. Анализ способов обработки и восстановления рабочих поверхностей изделий с использованием сборных фрез с СМП, токарных резцов с СМП и шлифовальных кругов, с оценкой их конструктивных и технологических ограничений;

3. Анализ методов и подходов к проектированию режущих инструментов для обработки фасонных деталей;

4. Анализ известных конструкций сборных фрез с СМП, токарных резцов с СМП и шлифовальных кругов для обработки поверхностей фасонных деталей;

5. Разработка элементов системы автоматизированного проектирования конструкций сборных фрез с СМП на основе системного подхода;

6. Расчет теоретической высоты остаточных микрогребешков при попутном и встречном фрезеровании сборными фрезами с СМП;

7. Определение кинематических задних углов и толщины срезаемого слоя сборных фрез с СМП при попутном и встречном фрезеровании в условиях формообразования фасонных поверхностей;

8. Разработка инновационного способа восстановления профиля катания колесных пар с использованием новой конструкции сборной фрезы с СМП и исследование влияния ее конструктивных параметров на стойкость обработки;

9. Экспериментальные исследования опытного образца разработанной конструкции сборной фрезы с СМП при обработке профиля катания колесных пар;

10. Оценка эффективности применения разработанной сборной фрезы с СМП в сравнении с традиционными методами восстановления профиля катания колесных пар.

Объектом исследования является процесс фрезерной обработки фасонных поверхностей деталей машиностроения сборными фрезами с СМП.

Предметом исследования являются конструктивные параметры сборных фрез с СМП и условия их применения, влияющие на стойкость инструмента при обработке фасонных участков поверхностей деталей.

Научная новизна работы заключается в:

1. Взаимосвязях между параметрами ориентации режущих пластин в корпусе сборной фасонной фрезы с СМП и показателями равномерности фрезерования, обеспечивающей повышение точности и снижение шероховатости обработанной поверхности профиля катания колесных пар.

2. Функциональной зависимости теоретической высоты остаточных неровностей в осевом сечении при фрезоточении профиля катания колесных пар

от величины продольной подачи сборной дисковой фрезы с учетом ориентации режущей кромки СМП в корпусе сборной фрезы.

3. Функциональных взаимосвязях между кинематическими задними углами при попутном и встречном фрезоточении и величинами подачи, глубины резания и диаметров колесной пары и сборной дисковой фрезы с СМП, и математической модели, основанной на этих взаимосвязях.

4. Выявленных функциональных взаимосвязях между максимальной толщиной срезаемого слоя при попутном и встречном фрезоточении колесных пар и величинами подачи, глубины резания и диаметров колесной пары и сборной дисковой фрезы с СМП, и математической модели, основанной на этих взаимосвязях.

Теоретическая значимость работы заключается в:

- разработке методики проектирования сборных фрез с СМП с учетом требований к повышенной стойкости и условий неравномерного фрезерования;
- установленных зависимостях между кинематическими геометрическими параметрами режущей части, условиями резания и износостойкостью инструмента;
- алгоритме расчета остаточных неровностей и условий обеспечения равномерности фрезерования сборными фрезами, позволяющем прогнозировать точность и шероховатость профиля на этапе конструкторской проработки;
- новых способах восстановления профиля катания колесных пар с применением шлифовальных кругов и сборных фрез с СМП или токарных резцов для повышения их стойкости.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Технологии комбинированной обработки, объединяющей черновое шлифование и фрезерование или точение, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента и эффективно восстанавливать геометрию поверхности катания колесных пар (Патент на изобретение РФ № 2850946 от 24.02.2025 г.);

2. Рекомендациях по выбору формы режущей кромки пластин, повторяющей заданную форму участка профиля колес, что позволяет повысить точность обработки профиля колес за один проход и увеличить производительность обработки (Патенты на изобретения РФ № 2746204 от 09.06.2020 г., и ЕА № 040649 от 25.02.2021 г.);

3. Рекомендациях по выбору формы режущей кромки пластин, повторяющей заданную форму участка профиля головки рельсов, что обеспечивает повышение точности обработки профиля головки рельсов за один проход и увеличение производительности (Патент на изобретение РФ № 2746202 от 09.06.2020 г.);

4. Рекомендациях по использованию сменных пластин с режущей кромкой, соответствующей форме фасонного профиля сложнопрофильных деталей, и выбору профиля колеса из заданного соотношения для повышения точности обработки (Патент на полезную модель РФ № 198166 от 14.01.2020 г.);

5. Новых конструкциях сборных фрез с СМП для восстановления фасонных деталей (Патенты на полезные модели РФ № 217298 от 13.12.2022 г., № 226505 от 29.01.2024, № 228044 от 28.12.2023 г., № 231960 от 05.09.2024 г.);

6. Алгоритме САПР конструкции сборной фасонной фрезы с СМП, обеспечивающий автоматизированный выбор геометрических и конструктивных параметров инструмента и позволяющий адаптировать его к условиям фрезерования различных профилей катания колесных пар (Свидетельство на программу для ЭВМ № 2025693726 от 19.11.2025 г.);

7. Алгоритме расчета остаточных неровностей после обработки фасонных деталей сборными фасонными фрезами с СМП, что позволяет повысить качество обработки (Свидетельство на программу для ЭВМ № 2021681009 от 08.12.2021 г.);

8. Алгоритме расчета неравномерности фрезерования фасонных деталей сборными фасонными фрезами с СМП, обеспечивающий стабильность процесса резания и равномерное снятие материала (Свидетельство на программу для ЭВМ № 2024610723 от 28.12.2023 г.);

9. Обоснованных рекомендациях по режимам резания при восстановлении профиля катания колесных пар дисковыми фрезами с СМП, обеспечивающие сокращение машинного времени обработки и повышение производительности;

10. Рекомендациях по выбору типа СМП в зависимости от твердости материала заготовки и требований к точности обработки, что позволяет повысить стабильность геометрии профиля и увеличить стойкость инструмента.

Методы исследования. В работе использован комплекс методов теоретического, вычислительного и экспериментального исследования, направленных на повышение стойкости сборных фрез при обработке фасонных поверхностей деталей машиностроения:

- Аналитические методы, основанные на положениях теории резания и системного анализа, для построения логико-структурных моделей сборных фрез;

- Методы математического моделирования, включая построение графовой структуры инструмента, расчет углов установки пластин, параметров равномерности фрезерования и остаточных неровностей;

- Численные методы, реализованные с использованием САПР-средств при проектировании геометрии сборных фрез и формировании алгоритма установки СМП;

- Экспериментальные методы, включающие обработку заготовок из сталей различной твердости, измерение сил, моментов и энергопотребления в процессе фрезерования, оценку шероховатости и точности обработанных поверхностей;

- Методы сравнительного анализа, применяемые для сопоставления эффективности фрезерной и токарной обработки профиля катания колесных пар.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проектирования сборной фасонной фрезы с СМП, ориентированная на повышение стойкости инструмента путем выбора его конструктивных параметров и расчета режимов резания при обработке профиля катания колесных пар;

2. Алгоритм расчета высоты остаточных неровностей и параметров равномерности фрезерования, позволяющий прогнозировать шероховатость и точность обработанной поверхности еще на этапе проектирования инструмента;

3. Конструкция сборной дисковой фрезы с СМП, адаптированная к различной твердости обрабатываемого материала и характеру износа фасонной поверхности, включая поверхность катания колесных пар как частный случай;

4. Комбинированный способ восстановления фасонных поверхностей, включающий черновое шлифование и последующую обработку разработанной фрезой, обеспечивающий снижение термомеханической нагрузки на режущие кромки, повышение стойкости инструмента и улучшение параметров качества поверхности.

5. Математическая модель определения кинематических задних углов, учитывающая соотношение режимных и конструктивных параметров, позволяющая выявить критические режимы фрезоточения, при которых происходит снижение эффективности стружкоотделения и ускоренный износ режущих пластин.

6. Расчетная методика определения максимальной толщины срезаемого слоя и ширины зоны контакта при фрезоточении фасонных поверхностей, учитывающая геометрию относительного движения фрезы и колесной пары, обеспечивающая обоснованный выбор режимов резания и предварительный прогноз стойкости инструмента.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается:

- применением обоснованных теоретических и экспериментальных методов, направленных на исследование стойкости режущего инструмента в условиях обработки фасонных поверхностей;

- соответствием применяемых методов расчета современным положениям теории резания, теории изнашивания и контактного взаимодействия в условиях переменных нагрузок;

- применением сертифицированных программных средств САПР для построения геометрических и параметрических моделей сборных фрез с СМП;

- проведением серии опытных обработок на заготовках из различных конструкционных и закаленных сталей с многократным повторением режимов, обеспечивающим воспроизводимость и устойчивость полученных результатов;

- сопоставлением экспериментальных данных с результатами численного моделирования и расчетов, выполненных на этапе проектирования конструкции инструмента;

- подтверждением повышения стойкости сборной фрезы с СМП по сравнению с традиционными решениями в условиях реального производства на базе промышленного предприятия;

- соответствием полученных результатов требованиям нормативной документации и др.;

- наличием актов приемочных испытаний и внедрения, подтверждающих работоспособность разработанной конструкции сборной фрезы с СМП и целесообразность ее промышленного применения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» подтверждается следующими аспектами: разработкой и исследованием конструкции сборной дисковой фрезы с СМП для восстановления профилей деталей сложной формы мобильных колесных платформ; проведением экспериментальных и теоретических исследований стойкости инструмента, сил резания и режимов обработки, включая расчет и оптимизацию конструктивных и режимных параметров инструмента. Указанная работа соответствует следующим направлениям исследований: 4. «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки»; 5. «Создание оборудования и инструментов для новых технологических процессов механической и физико-технической обработки»; 6. «Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования».

Апробация работы. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект No FSFS-2024-0012).

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, региональных и межвузовских научно-технических конференциях, например:

- в полуфиналах и финалах XIV и XV Национальной научно-технической конференции (ННТК), организованной Союзом машиностроителей России (Москва, 2024 и 2025);

- на Всемирном изобретательском форуме Global Invention Forum in Cyprus (Лимассол, Кипр, 2024);

- на 15-й Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2024);

- на 37-й Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2023);

- на международной выставке изобретений Kaohsiung International Invention & Design Expo, (Тайвань, 2022).

По теме диссертации опубликовано 22 печатных работ, включая 2 учебно-методических издания, 3 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК. Получены 8 патентов РФ на изобретения и полезные модели, 1 Евразийский патент на изобретение, а также 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов по каждой из глав, заключения, списка использованных источников из 104 наименований и 4 приложений. Материал диссертационной работы изложен на 192 страниц машинописного текста, содержит 57 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, представлена научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлены данные об апробации результатов, подтверждающие их достоверность.

В первой главе приведен анализ конструктивных и технологических требований к обработке деталей мобильных колесных платформ, имеющих фасонные профили с прямолинейной направляющей (головки рельсов, острия стрелочных переводов) и тел вращения (колесные пары, крановые колеса). Рассмотрены существующие способы восстановления их рабочих поверхностей и применяемые при этом режущие инструменты – токарные резцы с СМП, сборные фасонные фрезы с СМП и шлифовальные круги. Выполнен обзор методов проектирования сборных фасонных фрез с СМП и токарных резцов, используемых для обработки профиля катания колесных пар, а также проведен критический анализ диссертационных исследований в этой области. Показано, что, несмотря на имеющиеся результаты, остаются недостаточно проработанными

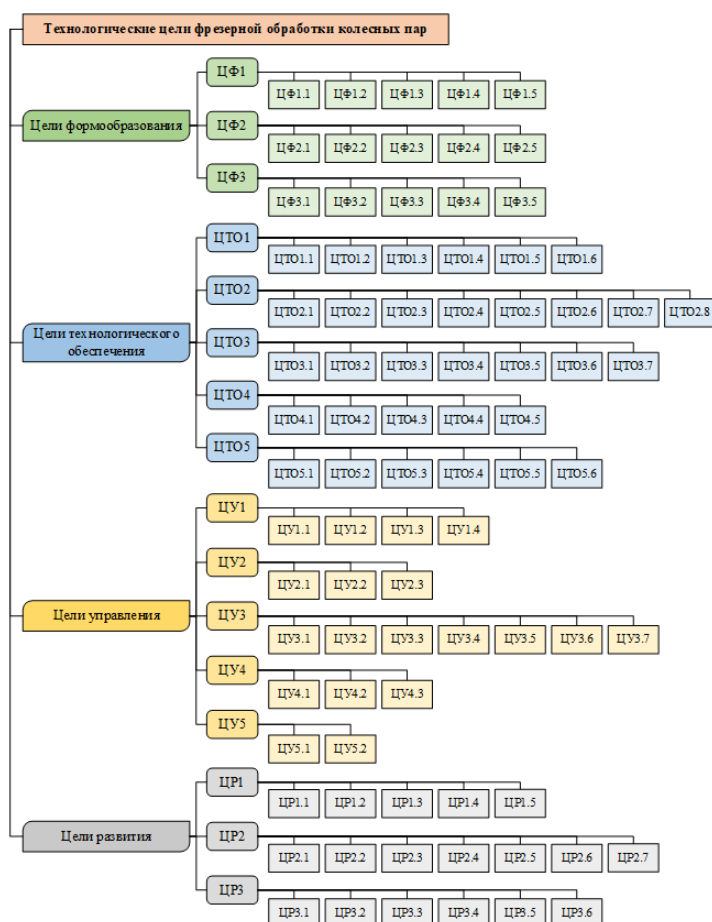


Рис. 1 – Структурно-функциональная модель метода фрезерования сборными фрезами с СМП для обработки профиля катания колесных пар

вопросы повышения универсальности, надежности и стойкости инструмента, а также сокращения трудоемкости его переналадки. Отмечена ограниченность применения отдельных конструктивных решений в условиях переменного износа и вариативной геометрии профиля катания. На основании анализа сформулированы требования, обеспечивающие повышение технико-экономической эффективности процессов восстановления, и обоснована целесообразность разработки сборной дисковой фрезы с СМП. В результате системного анализа метода фрезерования деталей мобильных колесных платформ предложена структурно-функциональная модель технологической системы (рис. 1), отражающая взаимосвязи между технологическими целями, конструктивными параметрами инструмента и характеристиками процесса обработки.

Во второй главе выполнен анализ известных технических решений в области инструментального обеспечения восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ. Рассмотрены конструкции сборных фасонных фрез с СМП, предназначенных для обработки головки рельса, бокового бочкообразного профиля, профиля острия стрелочного перевода, а также профиля катания колесных пар. Приведены особенности формы и расположения режущих пластин, схемы их установки и параметры ориентации в корпусе фрезы. Описаны технические решения, реализованные в разработках отечественных и мировых производителей с указанием конструктивных особенностей фрез и применяемых СМП.

Отдельно рассмотрены токарные резцы с СМП, используемые для восстановления профиля катания колесных пар. Проанализированы особенности их конструкции, включая формы режущих пластин, способы закрепления в картриджах, наличие стружколомов и направляющих поверхностей. Представлены характеристики наиболее распространённых конструкций резцов и дана оценка их применимости с точки зрения качества обработки, точности получаемого профиля и удобства наладки.

Описаны принципы применения шлифовальных кругов при черновом восстановлении сильно изношенных профилей катания колесных пар железнодорожных составов. Приведены сведения о формах кругов, характеристиках зернистости, типах связок и режимах обработки. Отмечены условия, при которых температура в зоне резания достигает $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим охлаждением и стабилизацией структуры обрабатываемого металла.

На основании выполненного сопоставления показано, что токарные резцы с СМП отличаются простотой наладки, но ограничены в производительности. Шлифование обеспечивает формообразование при сильном износе профиля катания колесных пар, но сопровождается значительным энергопотреблением и длительным машинным временем. Сборные фасонные фрезы с СМП обеспечивают высокую точность и производительность, но сложны в проектировании и изготовлении, требуют сложной настройки вне станка и характеризуются высокой стоимостью. В результате анализа обоснован выбор фрезерования в качестве перспективного метода восстановления профиля катания колесных пар, обеспечивающего оптимальное соотношение производительности, качества и технологической гибкости.

В третьей главе представлена методика проектирования сборных фрез с СМП для высокоэффективной обработки профиля катания колесных пар. Глава содержит:

- Блок-схему САПР сборной фасонной фрезы с СМП (рис. 2), обеспечивающую выбор параметров (профиль и ширина бандажа, толщина гребня, конструкция фрезы, диаметр фрезы, количество сегментов/ножей/пластин, угол наклона зуба, инструментальный материал, углы резания, режимы резания) на основе исходных данных (материал, профиль обрабатываемой поверхности колеса). Ножи/сегменты представляют собой

монтажные элементы, в которые устанавливаются режущие пластины и которые, в свою очередь, крепятся в корпус сборной фасонной фрезы.

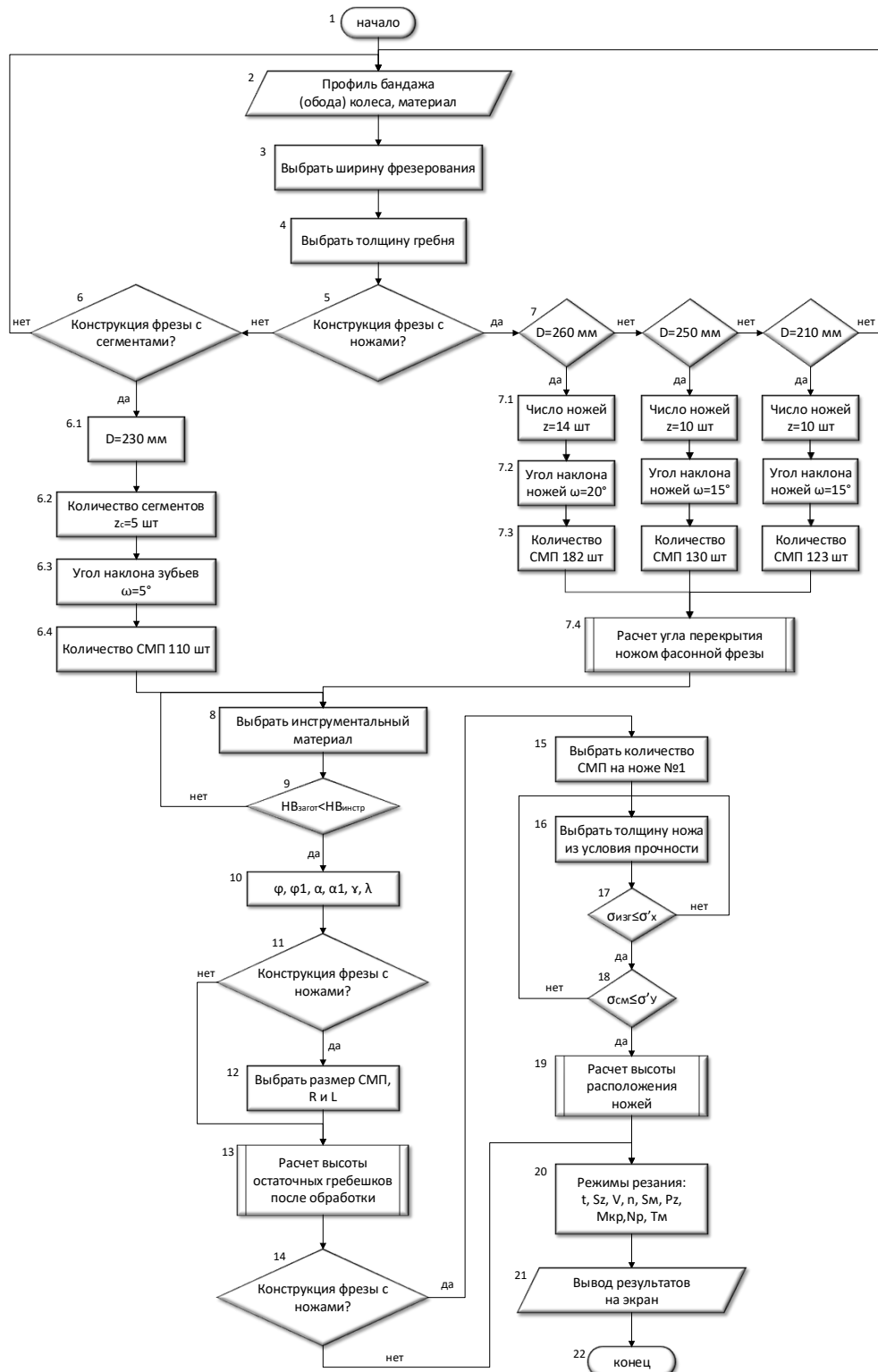


Рис. 2 – Блок-схема САПР сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами

- Доработанный вариант известной графовой модели обобщенной конструкции сборной фасонной фрезы с СМП $\Gamma_1 = (X, E)$, представляющей собой систему функционально связанных элементов и их параметров.

- Алгоритмы расчета геометрических параметров сборной фрезы: углов в нормальной плоскости (α_N, γ_N), угла наклона λ , радиального переднего угла $\gamma_{рад}$.
- Методику определения положения режущих пластин в ноже и ножей в корпусе сборной фасонной фрезы, включая способ настройки базовой точки K_i с использованием опорных пластин и расчет координат через матрицы поворота. Результат представлен на рис. 3.

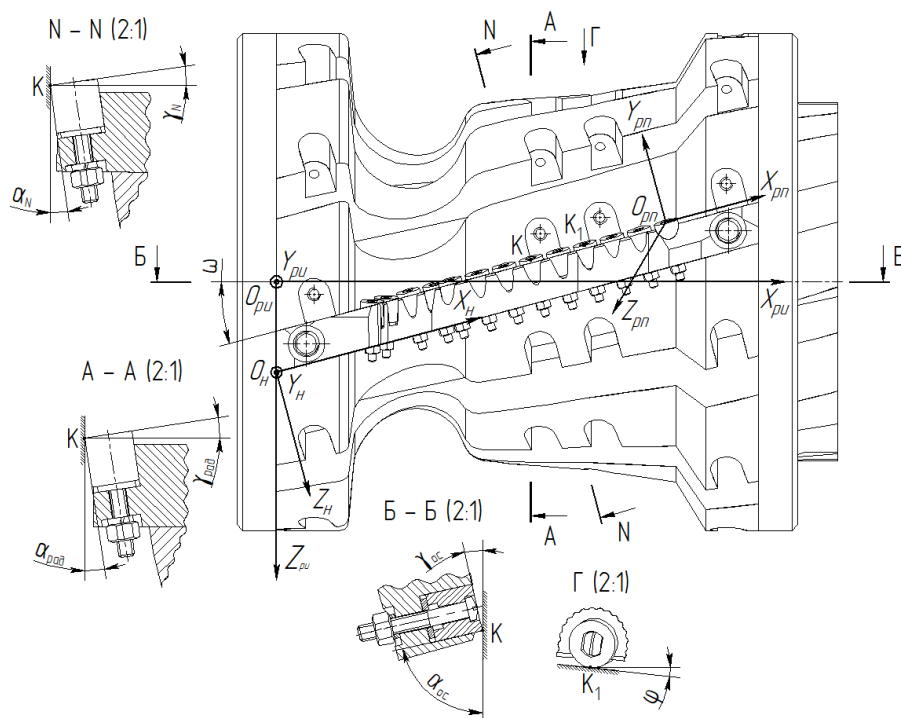


Рис. 3 – Система координат инструмента, ножа и СМП

- Анализ равномерности фрезерования: Разработана графическая схема (рис. 4) и блок-схема алгоритма расчета, где S_M – подача заготовки; n – частота вращения фрезы; $n_{гр}$ – количество режущих пластин на одном ноже; R_1 – максимальный радиус фрезы; R_{10} – минимальный радиус фрезы; R_{13} – последний радиус фрезы; t_{max} – максимальная глубина резания; r – радиус округления режущих кромок пластин; h – глубина смятия материала заготовки ($h = r$). Условием равномерности является нахождение в зоне резания не менее 2 пластин: ($Q = \frac{\psi_{кон}}{\psi_{накz}} \geq 2$, где $\psi_{кон}$ – ширина зоны резания (без смятия) одного ножа фрезы, $\psi_{накz}$ – шаг ножей фрезы). Установлена неравномерность нагрузки из-за геометрии профиля и предложены меры по ее снижению (увеличение ω , z ; уменьшение D).

- Исследование качества обработанной поверхности: Разработана блок-схема расчета высоты остаточных неровностей h (рис. 5) и получены формулы для вогнутых, выпуклых и прямолинейных участков профиля. Зарегистрирована программа для ЭВМ.

- Обоснование перехода к инновационной конструкции дисковых фрез с СМП (рис. 6) как альтернативе тяжелым (85 кг) и трудным в настройке сборным фасонным фрезам. Ключевые преимущества: малая масса (3 кг), простота конструкции, отсутствие настройки вне станка, низкая стоимость.

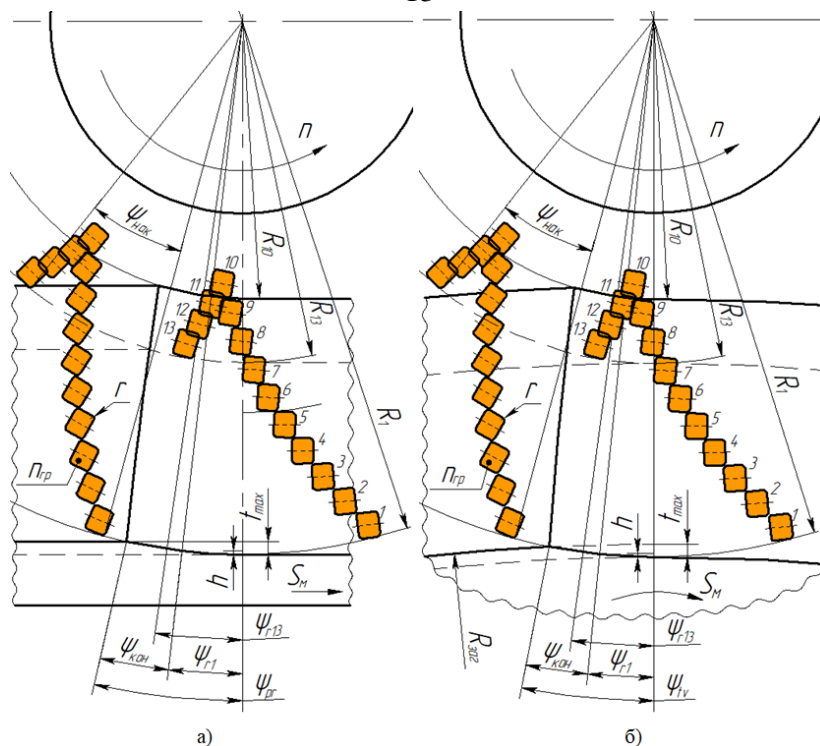


Рис. 4 – Схема попутного фрезерования: профиля головки рельсов (а), бандажа колесных пар (б)

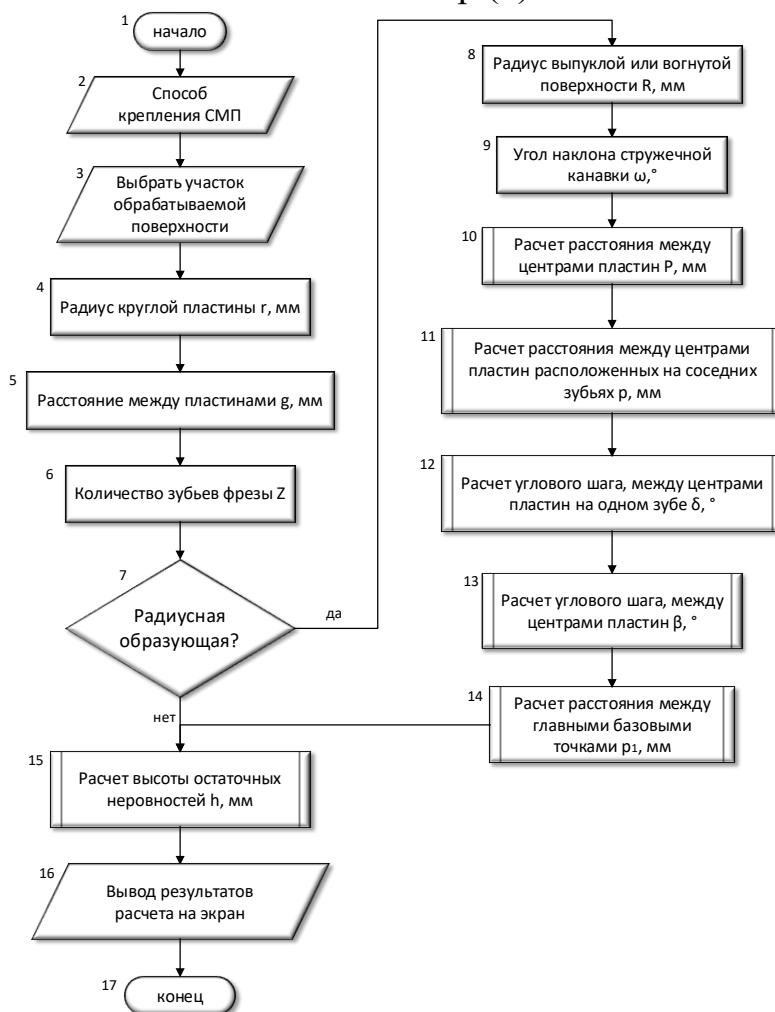


Рис. 5 – Блок-схема расчета высоты остаточных неровностей

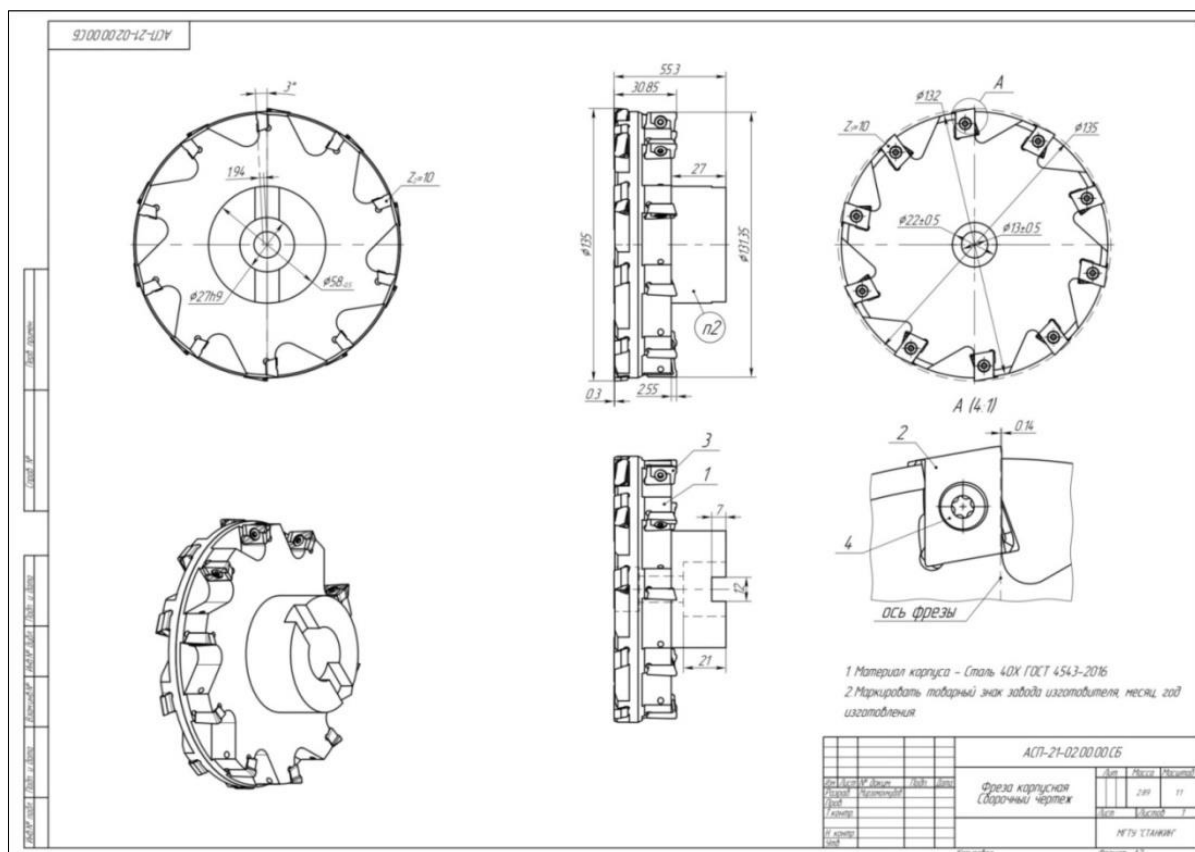


Рис. 6 – Сборочный чертеж дисковой фрезы с СМП

- Выбор СМП для дисковой фрезы: тангенциальных LNНU 1306 (основная обработка) и радиальных НМ90 АDКТ 1505PDR (внешняя поверхность гребня).
- Обоснование геометрических параметров сборной дисковой фрезы с учетом проходимости сборной фрезы по траектории обработки и прочности СМП.
- Анализ микрогеометрии обработанной поверхности: Разработана модель (рис. 7) формирования теоретической высоты остаточных неровностей в осевом сечении h_{re}^* с учетом радиуса при вершине пластины r_e и фактического угла φ_1^* ($h_{re}^* = \frac{S_z}{\cos(\text{ctg}\beta) \cdot (\text{ctg}(\varphi - \beta) + \text{ctg}(\varphi_1^* + \beta))} - (DC - r_e)$). Рассчитанные с использованием разработанных моделей значения высоты остаточных микрогребешков сведены в табл. 1.

Таблица 1

Полученные значения по проведенным расчетам.

№ участка	4 и 5	
	Оборотная подача S_m , периф., мм/об	5
Высота остаточных неровностей после обработки фрезерованием сборными фасонными фрезами с СМП h , мм	0.043 (10.75*)	
Высота остаточных гребешков после точения h_t , мм	0.036 (9*)	
Высота остаточных микрогребешков после фрезоточения в осевой плоскости h , мм	0.031 (7.81*)	0.138 (34.4*)
Высота остаточных микрогребешков после фрезоточения в радиальной плоскости h , мм	0.00053 (0.133*)	0.0048 (1.19*)
*(в скобках – R_a , мкм)		

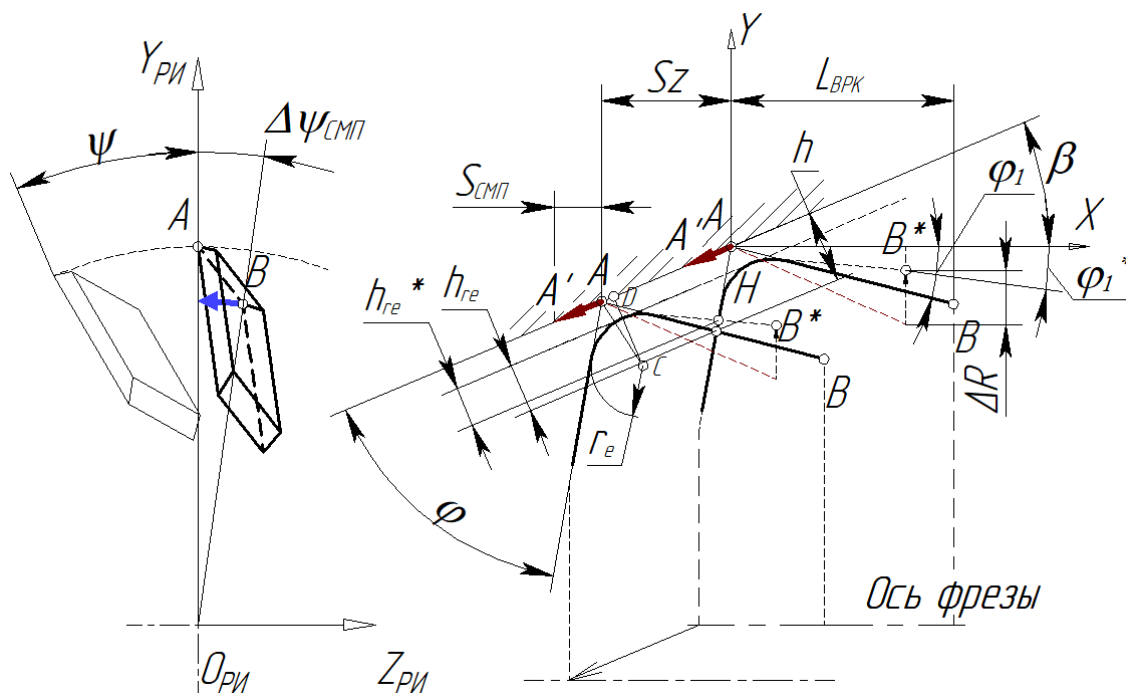


Рис. 7 – Расчетная схема высоты остаточных микрогребешков при фрезоточении

- Математические модели и расчетные схемы (рис. 8) для определения кинематических задних углов $\alpha_{кин}$, толщины срезаемого слоя h_{max} , угла контакта ψ и длины дуги контакта B_k при встречном и попутном фрезеровании (табл. 2 и 3).

Угол наклона касательной к траектории движения зуба фрезы в искомой точке:

$$\eta = \operatorname{arctg} \frac{dy}{dx}, \quad (1)$$

причем для встречного фрезерования:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{\frac{dy}{d\vartheta}}{\frac{dx}{d\vartheta}} = \frac{\cos \vartheta (R_{\phi p} + \rho) + \rho K \cos\left(-\frac{\rho K}{R_{\phi p}} \vartheta\right)}{-\sin \vartheta (R_{\phi p} + \rho) - \rho K \sin\left(-\frac{\rho K}{R_{\phi p}} \vartheta\right)} \quad (2)$$

для попутного фрезерования:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{\frac{dy}{d\vartheta}}{\frac{dx}{d\vartheta}} = \frac{\cos \vartheta (R_{\phi p} + \rho) + \rho K \cos\left(-\frac{\rho K}{R_{\phi p}} \vartheta\right)}{-\sin \vartheta (R_{\phi p} + \rho) - \rho K \sin\left(-\frac{\rho K}{R_{\phi p}} \vartheta\right)} \quad (3)$$

Окончательно кинематический задний угол в искомой точке равен:

$$\alpha_{кин} = \alpha_{ст} \pm (90^\circ - \Theta_{\phi p} - \eta), \quad (4)$$

Тогда максимальная толщина срезаемого слоя, равная длине отрезка АВ, определяется как расстояние между двумя точками:

$$h_{max} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}. \quad (5)$$

Показано незначительное (менее 5%) изменение $\alpha_{кин}$ в стандартных режимах (табл. 4).

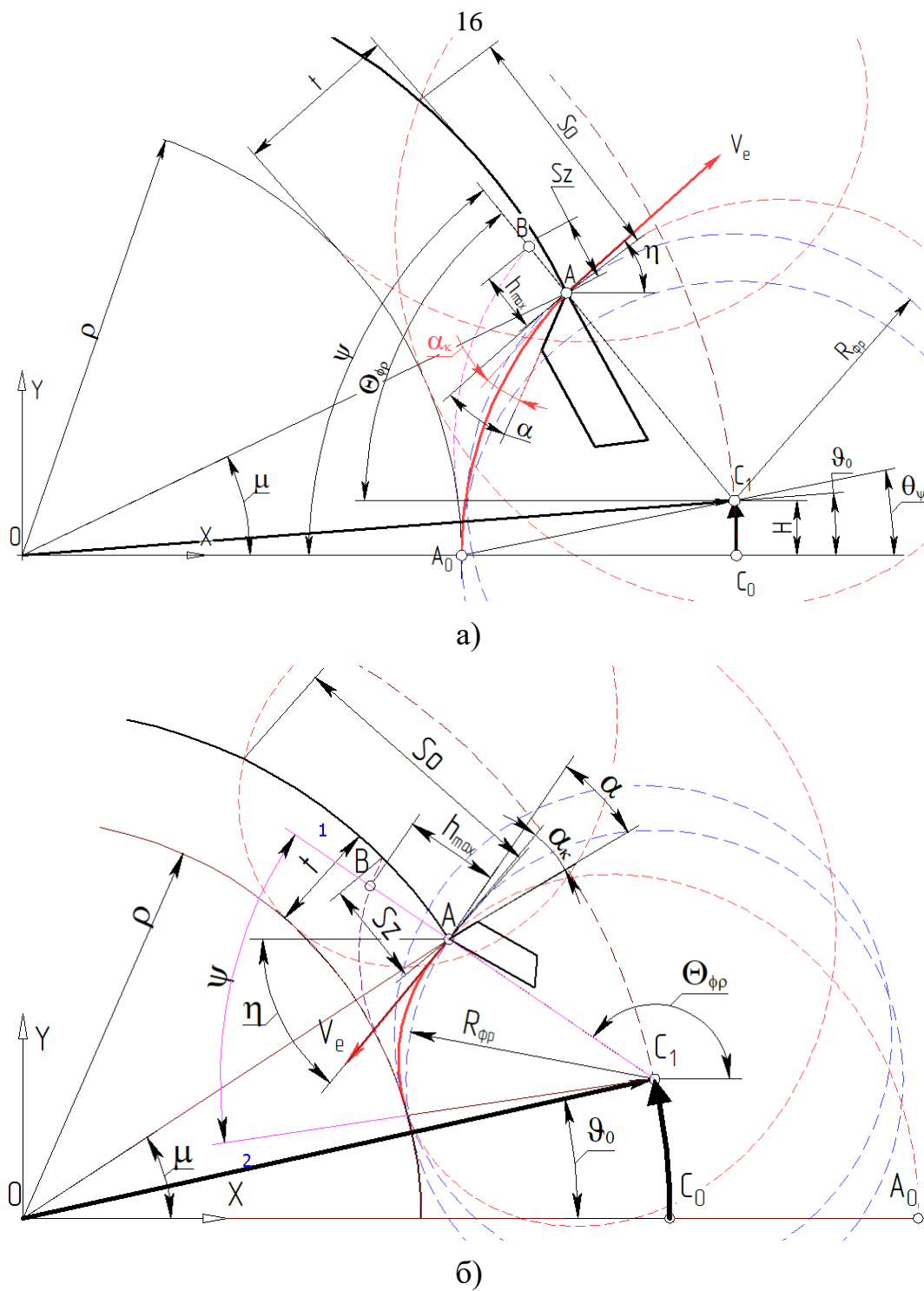


Рис. 8 – Расчетная схема для кинематического заднего угла при: встречном (а) и попутном (б) фрезеровании колесной пары

Таблица 2

Параметры срезаемого слоя при встречном фрезеровании.

t, мм	$s_{об} = 0.5$ мм			$s_{об} = 1.0$ мм			$s_{об} = 3.5$ мм			$s_{об} = 10.0$ мм		
	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм
1	0.009	9.3	10.9	0.017	9.3	10.9	0.054	9.3	11.0	0.100	9.5	11.2
2	0.013	13.1	15.5	0.025	13.1	15.5	0.080	13.2	15.6	0.176	13.4	15.8
3	0.016	16.1	18.9	0.031	16.1	19.0	0.100	16.2	19.1	0.234	16.4	19.4
6	0.022	22.9	26.9	0.043	22.9	27.0	0.145	23.0	27.1	0.365	23.4	27.5

Таблица 3

Параметры срезаемого слоя при попутном фрезеровании.

t, мм	$S_{об} = 0.5$ мм			$S_{об} = 1.0$ мм			$S_{об} = 3.5$ мм			$S_{об} = 10.0$ мм		
	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм	h_{max} , мм	ψ , °	B_k , мм
1	0.009	9.2	10.9	0.018	9.2	10.8	0.055	9.0	10.7	0.101	8.7	10.2
2	0.013	13.1	15.4	0.025	13.0	15.4	0.081	12.9	15.2	0.181	12.5	14.8
3	0.016	16.0	18.9	0.031	16.0	18.9	0.102	15.9	18.7	0.242	15.5	18.3
6	0.022	22.8	26.9	0.044	22.8	26.8	0.148	22.7	26.7	0.380	22.3	26.3

Таблица 4

Величины разницы между кинематическим и статическим задним углом, $\Delta\alpha^\circ$, при различных параметрах обработки колесной пары сборной дисковой фрезой.

t, мм	$S_{об} = 0.5$ мм		$S_{об} = 1.0$ мм		$S_{об} = 3.5$ мм		$S_{об} = 10.0$ мм		$S_{об} = 20.0$ мм	
	Поп.	Встр.	Поп.	Встр.	Поп.	Встр.	Поп.	Встр.	Поп.	Встр.
1	0.01	0.01	0.03	0.03	0.09	0.09	0.25	0.24	0.52	0.47
3	0.02	0.02	0.04	0.04	0.15	0.15	0.44	0.42	0.90	0.81
6	0.03	0.03	0.06	0.06	0.21	0.20	0.61	0.58	1.26	1.14

- Практическая реализация: Разработаны конструкции сборных фрез с СМП (защищенные патентами РФ), создана параметрическая модель в T-Flex CAD и комплект конструкторско-технологической документации, изготовлен опытный образец сборной дисковой фрезы с СМП.

В четвертой главе представлены технологические решения по применению разработанной дисковой фрезы с СМП для восстановления профиля катания колесных пар. Изложен принцип фрезерования, который обеспечивает равномерное распределение нагрузки и повышение стойкости (рис. 9). Приведена траектория перемещения инструмента, реализованная для трехкоординатного фрезерного станка с ЧПУ и расчет режимов резания.

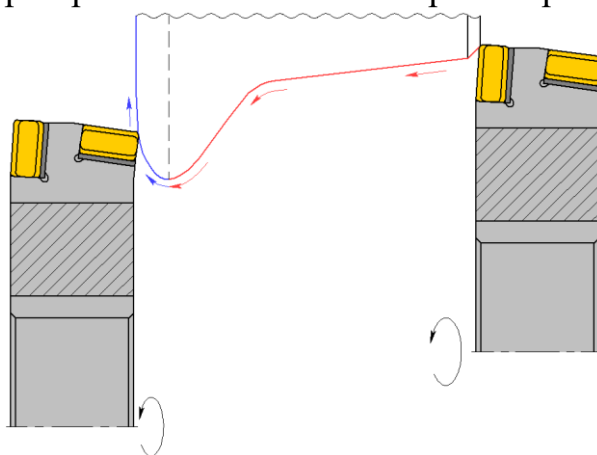


Рис. 9 – Принцип обработки колесных пар с помощью дисковой фрезы с СМП

Разработан комбинированный способ восстановления профиля (2) катания колесных пар (1), основанный на черновом шлифовании (5) с одновременной фрезерной (4) или токарной (3) обработкой (рис. 10). Черновое шлифование позволяет стабилизировать структуру металла за счет локального нагрева зоны резания, что снижает сопротивление резанию на этапе формообразования и

уменьшает износ режущего инструмента. Рассмотрены различные схемы реализации комбинированной обработки в зависимости от характера износа и условий производства. Получен патент на изобретение РФ (№ 2850946 от 24.02.2025 г.) на разработанный комбинированный способ восстановления изношенных поверхностей катания колесных пар.

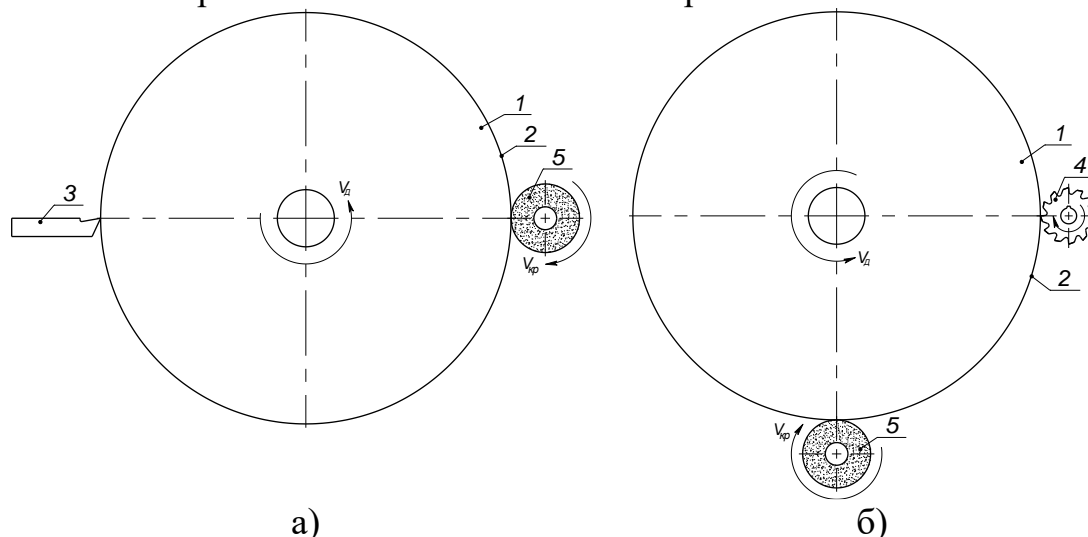


Рис. 10 – Комбинированный способ обработки: обточкой (а), фрезерованием (б)

Обоснована конфигурация технологической системы фрезерования профиля катания колесных пар с использованием сборной дисковой фрезы с СМП. Для обеспечения работоспособности системы на стадии проектирования была проведена серия предварительных расчетов режимов фрезерования с целью определения кинематических и силовых характеристик (табл. 5).

Таблица 5

Режимы резания дисковой фрезы с СМП при различных глубинах резания.

t, мм	V, м/мин	n, об/мин	S _{м, периф.} , мм/мин	S _{м продольн.} , мм/мин	P _z , Н	M _{кр} , Н*м	N _е , кВт
1	180	440	440	0.13	823.4	55.6	2.4
1.5					1246.8	84.2	3.7
2					1600.1	108	4.7
1	280	685	685	0.2	823.4	55.6	3.8
1.5					1246.8	84.2	5.7
2					1600	108	7.3
1	180	440	1540	0.45	2137.1	144.3	6.3
1.5					3163.9	213.6	9.3
2					4177.8	282	12.3
1	280	685	2400	0.7	2137.1	144.3	9.8
1.5					3163.9	213.6	14.5
2					4177.8	282	19.1
1	180	440	11020	3.2	5937.4	400.8	17.5
1.5					7978.8	538.6	23.5
2					9676.1	653.1	28.5
1	280	685	17140	4.97	5937.4	400.8	27.2
1.5					7978.8	538.6	36.5
2					9676.1	653.1	44.3

Изложенные в главе подходы обеспечивают расширение технологических возможностей производственной системы и формируют основу для автоматизированного восстановления профиля катания колесных пар с применением разработанного инструмента.

В пятой главе представлены экспериментальные исследования, направленные на проверку работоспособности разработанной конструкции дисковой фрезы с СМП при восстановлении профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ. Целью испытаний являлось получение объективных данных о стойкости разработанного инструмента и о технологических характеристиках фрезерования, включая силы резания, крутящий момент, параметры шероховатости, качество профиля и машинное время, а также сопоставление результатов с традиционным методом – точением.

Эксперименты проводились на трехкоординатном фрезерном станке с ЧПУ модели DEED VMC-60C. Обработка осуществлялась на заготовках, различающихся по материалу (стали 40X с твердостью 20 HRC \approx 230 HB и 45 HRC \approx 423 HB, а также 35XГСН с твердостью 57HRC \approx 620HB) и типу применяемых СМП (тангенциальные LNНU 1306 и радиальные АДКТ 1505).

Проведен анализ силовых и энергетических характеристик процесса: определены сила резания, крутящий момент и мощность, потребляемая в процессе обработки для разных сочетаний материала и пластин (табл. 6). Отмечено снижение крутящего момента из-за уменьшения подачи на зуб при переходе от стали 40X к стали 35XГСН, а также влияние формы и ориентации пластин на нагрузку по осям шпинделя и стойкость инструмента.

Таблица 6

Параметры резания и значения нагрузок по шпинделю и трем осям станка.

№ опыта	1	2	3	4	5	6
Материал	40X (20 HRC \approx 230 HB)		40X (45 HRC \approx 423 HB)		35XГСН (57HRC \approx 620HB)	
СМП	LNНU 1306	АДКТ 1505	LNНU 1306	АДКТ 1505	LNНU 1306	АДКТ 1505
t, мм	2					
V, м/мин	330	300	125	100	80	60
S _z , мм/зуб	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1
n, об/мин	808	735	300	240	190	145
S _{м.прод} , мм/мин	4.86	4.42	1.84	1.47	1.18	0.88
P _s , Н	1500	1186.23	1238.1	1035.7	1461.31	1238.65
M _{кps} , Н*м	77.76	78.3	83.7	64.36	53.68	49.5
N _{es} , кВт	3.39	3.49	2.73	1.69	2.67	1.22
P _x , Н	391.32	296.56	309.52	236.76	377.11	340.63
M _{кpx} , Н*м	27.83	21.09	22.01	16.83	26.82	24.22
N _{ex} , кВт	1.15	0.87	0.63	0.39	0.49	0.34
P _y , Н	456.54	381.29	397.95	325.5	612.81	526.43
M _{кpy} , Н*м	32.47	27.12	28.3	23.15	43.6	37.44
N _{ey} , кВт	1.34	1.12	0.81	0.53	0.8	0.52
P _z , Н	652.19	508.38	530.61	473.45	471.39	371.6
M _{кpz} , Н*м	46.38	36.15	37.73	33.67	33.52	26.43
N _{ez} , кВт	1.92	1.49	1.08	0.78	0.62	0.37

Исследована шероховатость обработанной поверхности в двух направлениях – вдоль и поперек следа фрезерования. Полученные значения R_a (2.0–5.1 мкм) соответствуют требованиям ГОСТ 11018-2011 и оказываются ниже, чем при токарной обработке, где R_a достигает 8–10 мкм.

Выполнено сопоставление показателей времени токарной и фрезерной обработки. Установлено, что при фрезеровании с использованием разработанной фрезы основное (машинное) время составляет 25.5 мин., что на 1.25 мин. больше, чем при токарной обработке на предприятии ОАО «ТВЗ» и на 8 мин. меньше, чем при токарной обработке на ОАО «ДМЗ» (табл. 7). Производительность обработки достигается благодаря более высокой стойкости дисковой фрезы с СМП по сравнению с токарными резцами (не менее чем на 20%).

Таблица 7

Сравнение параметров токарной и фрезерной обработки колесных пар.

Предприятие	ДМЗ		ТВЗ		Фрезерование ДФ	
	Диаметр колеса D , мм	1100	1060	1010	1009	957
Длина профиля L_1 и L_2 , мм	175	85	175	175	114	17
Глубина резания t , мм	1.5	2	3.5	1	2	2
Кол-во проходов i	2	2	1	1	1	1
Подача продольная S , мм/мин	14.5	18	15.5	18	4.9	4.7
Частота вращения колеса n , об/мин	12.8	12.8	11	18	4–7	4–7
Скорость резания V , м/мин	44.6	42.6	35	57	330	320
Основное (машинное) время T_m , мин	33.58		24.25		25.5	
Шероховатость обработанной поверхности R_a , мкм	9–10		9–10		2–5.1	
Предельная величина износа по задней поверхности, мм	0.6–0.8		0.6–0.8		1–1.2	
Кол-во обработанных колесных пар без поворота СМП	1–5		1–5		6 и более	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы решена научно-техническая задача, имеющая важное значение для машиностроительного производства, заключающаяся в разработке и исследовании конструкции сборной фрезы с СМП для восстановления фасонных деталей мобильных колесных платформ, при этом особое внимание уделено повышению стойкости режущего инструмента за счет конструктивных и технологических решений, обеспечивающих устойчивость процесса резания в условиях переменных нагрузок и сложной геометрии обрабатываемой поверхности.

1. На основе анализа технических требований к обработке фасонных профилей с прямолинейной направляющей и тел вращения установлено, что такие изделия характеризуются высокой твердостью до 320–402 НВ, малой шероховатостью ($R_z = 7–15$ мкм для рельс и $R_a = 6.3–10$ мкм для колесных пар крановых колес) и сложной геометрией, что предъявляет высокие требования к инструменту по точности, стойкости и стабильности резания.

2. Установлено, что механическая обработка с применением сборных фрез с СМП, токарных резцов и шлифовальных кругов обеспечивает высокую точность восстановления при износе колесных пар до 10–12 мм. При более глубоком износе целесообразно применение комбинированного метода с предварительной наплавкой. Основными ограничениями являются требования к жесткости, ограниченная глубина резания и технологическая сложность настройки.

3. Показано, что существующие методы проектирования инструмента обеспечивают частичное повышение стойкости и точности, но требуют применения системного подхода, включающего установление взаимосвязей между технологическими целями процесса обработки и конструктивными параметрами сборной фрезы с СМП, что особенно актуально при обработке профиля катания колесных пар и других сложнопрофильных деталей.

4. Анализ существующих конструкций сборных фасонных фрез с СМП показал, что такие фрезы (до 198 пластин, $\varnothing 250$ –600 мм) обладают высокой производительностью, но требуют сложной наладки. Токарные резцы менее стойки при переменных нагрузках, а шлифовальные круги обеспечивают высокое качество, но сопровождаются высокой температурной нагрузкой. Выбор метода обработки и типа инструмента должен учитывать параметры износа и требования к качеству восстановления фасонных поверхностей деталей мобильных колесных платформ.

5. Разработан элемент САПР сборных фрез с СМП в виде блок-схемы и программы выбора конструктивных параметров ($D_{\text{фр}} = 210$ –260 мм, $z = 10$ –14, наклон ножей 15–20°, до 182 пластин) и режимов резания. Разработанный элемент САПР повышает удобство проектирования и позволяет адаптировать конструкцию инструмента под условия фрезерования различных профилей катания колесных пар мобильных колесных платформ.

6. Выполнен расчет высоты остаточных неровностей h при фрезеровании профиля катания колесных пар сборными фрезами с СМП. Для прямолинейных участков при обработке сборной фасонной фрезой с круглыми СМП теоретическая величина $h = 0.043$ мм, для вогнутых участков $R = 45$ и 12.5 мм – $h = 0.036$ и 0.029 мм, для выпуклого участка $R = 15$ мм – $h = 0.089$ мм. При попутном фрезоточении дисковой фрезой с СМП с подачей $S_z = 0.5$ мм/зуб и радиусе скругления пластины $r_e = 0.8$ мм расчетная высота микрогребешков в осевой плоскости равна 0.031 мм ($R_a = 7.81$ мкм). Установлено, что величина остаточных неровностей зависит от подачи S_z , радиуса скругления пластины r_e и углов установки пластины в корпусе фрезы, что позволяет учитывать параметры микрогеометрии на этапе проектирования инструмента.

7. Выполнено численное моделирование кинематических задних углов $\alpha_{\text{кин}}$ при попутном и встречном фрезеровании сборной дисковой фрезой диаметром 135 мм с 10 зубьями. Установлено, что разница $\Delta\alpha$ не превышает 0.9°, что укладывается в допуски ($\pm 1^\circ$). При встречном фрезеровании толщина срезаемого слоя h_{max} изменяется от 0.009 до 0.365 мм, длина дуги контакта B_k от 10.9 до 27.5 мм; при попутном фрезеровании h_{max} составляет 0.009–0.38 мм, B_k –

10.2–26.3 мм. Зависимость h_{\max} от подачи носит нелинейный характер: с увеличением подачи наблюдается резкий рост толщины срезаемого слоя. Результаты использованы для обоснования режимов фрезерования с учетом направления подачи и формы профиля заготовки.

8. Разработан комбинированный способ восстановления профиля катания колесных пар, включающий черновое шлифование и последующую лезвийную обработку – фрезерование или точение. На основании анализа научно-технической литературы установлено, что черновое шлифование при $V_{\text{кр}} = 30\text{--}35$ м/с и глубине резания до 11.8 мм обеспечивает нагрев зоны резания до 850°C и формирование перлитно-сорбитной структуры, что снижает сопротивление резанию и повышает стойкость инструмента. Совмещение операций шлифования и лезвийной обработки позволяет сократить время восстановления профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ, снизить нагрузку на режущий инструмент и улучшить качество обработанной поверхности.

9. Проведены экспериментальные исследования разработанной сборной фрезы с СМП, оснащенной тангенциальными пластинами LNНU 1306 и радиальными пластинами АДКТ 1505. При обработке сталей 40Х и 35ХГСН установлено, что износ LNНU 1306 составил 0.78 мм при наработке 142.7 мин, при этом пластины сохраняют работоспособность и могут использоваться далее. Радиальные пластины АДКТ 1505 достигли критического износа 1.25 мм уже через 53.3 мин и признаны непригодными к дальнейшему применению. Таким образом, стойкость тангенциальных пластин оказалась в 2.7 раза выше, что подтверждает целесообразность их использования для фрезерования фасонных поверхностей колесных пар. Полученные значения шероховатости поверхности $R_a = 1.967\text{--}5.091$ мкм соответствуют требованиям ГОСТ 11018-2011.

10. Проведен сравнительный анализ с точением на основе данных машиностроительных производств. При фрезеровании основное (машинное) время составило 32.67 мин, стойкость – 196 мин, а шероховатость $R_a = 2\text{--}5.1$ мкм. Для точения основное (машинное) время составило 24.25–33.58 мин, стойкость – 122.5–177.5 мин, $R_a = 9\text{--}10$ мкм. Таким образом, обработка с использованием разработанной конструкции сборной дисковой фрезы с тангенциальными пластинами обеспечивает улучшение показателей стойкости, качества поверхности и уменьшение затрат на наладку по сравнению с традиционными методами восстановления профиля катания колесных пар.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. **Мирзомахмудов, А.Р.** Повышение эффективности обработки колесных пар сборными фасонными фрезами за счет обеспечения равномерности фрезерования / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2023. – № 3 (66). – С. 79–85.

2. **Мирзомахмудов, А.Р.** Разработка сборной дисковой фрезы со сменными многогранными пластинами для обработки фасонных деталей / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев // «СТАНКОИНСТРУМЕНТ». 2026. № 1. – В печати.

3. **Мирзомахмудов, А.Р.** Проектирование и эксплуатация резьбовых фрез для планетарного фрезерования резьб на трубах нефтяного сортамента / Г.А. Самсоненко, В.А. Гречишников, А.Р. Мирзомахмудов // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2024. – № 4 (71). – С. 22–32.

4. **Мирзомахмудов, А.Р.** Проектирование сборных и цельных режущих инструментов: учеб. пособие / В.А. Гречишников, В.А. Кузнецов, П.М. Пивкин и др. – М.: «Янус-К», 2025. – 300 с.

5. **Мирзомахмудов, А.Р.** Проектирование специальных режущих инструментов: учеб. пособие / Гречишников В.А., Пивкин П.М., Кузнецов В.А. и др. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. – 206 с.

6. **Мирзомахмудов, А.Р.** Комбинированный способ обработки профиля катания колесных пар для снижения нагрузки на режущий инструмент / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев, В.А. Кузнецов, и др. // Машиностроение: традиции и инновации: сб. докл. XVIII Всерос. конф. с междунар. участием – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2025. – С. 263–274.

7. **Мирзомахмудов, А.Р.** Проектирование конструкций сборных фасонных фрез для обработки железнодорожных изделий / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тезисы докл. 37-й Международ. науч.-техн. конф. – Минск: Бизнесофсет – 2023. – С. 47–49.

8. **Мирзомахмудов, А.Р.** Проектирование сборных фрез для обработки колесных пар / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев // Наукоемкие технологии в машиностроении: сб. матер. XV Международ. науч.-техн. конф. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2024. – С. 330–333.

9. **Мирзомахмудов, А.Р.** Разработка инновационной конструкции дисковой фрезы со сменными многогранными пластинами для обработки профилей колесных пар железнодорожных составов / А.Р. Мирзомахмудов // Сборник научных трудов XIV Национальной научно-технической конференции. – М.: Союз машиностроителей России, 2025. – С. 51–56.

10. **Мирзомахмудов, А.Р.** Разработка элементов технологической системы для повышения эффективности обработки профиля колесных пар железнодорожных составов / А.Р. Мирзомахмудов, А.В. Исаев // XII Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сб. науч. тр. – Минск: БНТУ, 2024. – С. 121–129.

11. Патент № 040649 Евразия, МПК В23С 3/00, В23С 5/02, В23С 5/16. Сборная фасонная фреза для обработки профиля железнодорожных колес / Исаев А.В., Гречишников В.А., **Мирзомахмудов А.Р.** – № 202100060; заявл. 25.02.2021; опубл. 11.07.2022. – 5 с.

12. Патент № 2746204 Российская Федерация, МПК В23С 3/00, В23С 5/00, E01В 31/02. Сборная фасонная фреза для обработки профиля железнодорожных колес / Исаев А.В., Гречишников В.А., **Мирзомахмудов А.Р.** – № 2020119128; заявл. 09.06.2020; опубл. 08.04.2021, Бюл. № 10. – 10 с.

13. Патент № 2746202 Российская Федерация, МПК В23С 3/00, В23С 5/00, E01В 31/02. Сборная фасонная фреза для обработки профиля головки рельсов / Исаев А.В., Гречишников В.А., **Мирзомахмудов А.Р.** – № 2020119126; заявл. 09.06.2020; опубл. 08.04.2021, Бюл. № 10. – 9 с.

14. Патент № 2850946 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ восстановления изношенных поверхностей катания колесных пар / Кузнецов В.А., Гречишников В.А., Исаев А.В., Хариев И.Н., **Мирзомахмудов А.Р.**, Кострюков А.А. – № 2025104121; заявл. 24.02.2025; опубл. 17.11.2025, Бюл. № 32. – 11 с.

15. Патент № 198166 Российская Федерация, МПК В23С 5/02. Сменная тангенциальная многогранная режущая пластина / Исаев А.В., **Мирзомахмудов А.Р.**, Романов В.А. – № 2020100802; заявл. 14.01.2020; опубл. 22.06.2020, Бюл. № 18. – 5 с.

16. Патент № 217298 Российская Федерация, МПК В23С 5/08. Дисковая фреза / Пивкин П.М., **Мирзомахмудов А.Р.**, Исаев А.В., Ершов А.А. – № 2022132628; заявл. 13.12.2022; опубл. 27.03.2023, Бюл. № 9. – 8 с.

17. Патент № 226505 Российская Федерация, МПК В23С 3/02, В23С 5/14, E01В 31/02. Сборная фасонная фреза / Пивкин П.М., **Мирзомахмудов А.Р.**, Гречишников В.А., Исаев А.В., Уварова Л.А., Прус М.Ю. – № 2024102144; заявл. 29.01.2024; опубл. 05.06.2024, Бюл. № 16. – 6 с.

18. Патент № 228044 Российская Федерация, МПК В23С 3/02, В23С 5/14, E01В 31/02. Сборная фасонная фреза / Надыкто А.Б., **Мирзомахмудов А.Р.**, Пивкин П.М., Гречишников В.А., Исаев А.В. – № 2023135824; заявл. 28.12.2023; опубл. 13.08.2024, Бюл. № 23. – 6 с.

19. Патент № 231960 Российская Федерация, МПК В23С 5/08. Дисковая фреза для обработки бандажей колесных пар / **Мирзомахмудов А.Р.**, Самсоненко Г.А., Исаев А.В., Домнин П.В. – № 2024126124; заявл. 05.09.2024; опубл. 19.02.2025, Бюл. № 5. – 7 с.

20. Свидетельство о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2021681009 Российская Федерация. Calculation of residual roughness of railway wheelsets (RRRW) / Исаев А.В., Гречишников В.А., **Мирзомахмудов А.Р.**, Халухаева Л.М. – № 2021680230; дата поступл. 08.12.2021; дата регистр. 16.12.2021. – 1 с.

21. Свидетельство о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2024610723 Российская Федерация. Программа для расчета условия равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами / **Мирзомахмудов А.Р.**, Исаев А.В., Романов В.Б. – № 2023689959; дата поступл. 28.12.2023; дата регистр. 12.01.2024. – 1 с.

22. Свидетельство о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2025693726 Российская Федерация. САПР сборной фасонной фрезы с СМП / **Мирзомахмудов А.Р.**, Исаев А.В., Тагаев А.И. – № 2025692298; дата поступл. 19.11.2025; дата регистр. 01.12.2025. – 1 с.

Научное издание

Мирзомахмудов Азимжон Рустамович

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СБОРНЫХ ФРЕЗ СО СМЕННЫМИ МНОГОГРАННЫМИ ПЛАСТИНАМИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МОБИЛЬНЫХ КОЛЕСНЫХ ПЛАТФОРМ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 19.02.2026.

Формат 60×90 1/16. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ ____.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом центре
ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
127055, Москва, Вадковский пер., 3а
Тел.: 8(499) 973-31-93