

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Исаев Александр Вячеславович

Москва 2025

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ.....	16
1.1. Технические требования к конструкции головки рельсов мобильных колесных платформ.....	16
1.2. Технические требования к конструкции профиля острия стрелочных переводов	19
1.3. Технические требования к конструкции профиля катания колесных пар.	21
1.4. Анализ способов восстановления рабочих поверхностей колесных пар...	25
1.5. Критический анализ работ по проектированию режущих инструментов, применяемых в машиностроении.....	28
1.6. Системный подход к выбору метода восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей.....	42
1.6.1. Введение в системный анализ в машиностроении.....	42
1.6.2. Системный анализ методов восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ.....	45
1.6.3. Взаимосвязи технологических целей с конструктивными параметрами сборной фрезы для обработки фасонных деталей.....	49
1.7. Общая модель конструкции сборных фасонных фрез.....	63
1.8. Выводы по главе 1.....	65
ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ.....	67

2.1. Сборные фасонные фрезы для обработки головки рельса	67
2.2. Сборные фасонные фрезы для обработки боковых бочкообразных профилей рельсов.....	68
2.3. Сборные фасонные фрезы для обработки профиля остряка стрелочных переводов	70
2.4. Сборные фасонные фрезы для восстановления профиля катания колесных пар	71
2.5. Токарные резцы для восстановления профиля катания колесных пар	73
2.6. Шлифовальные круги для обработки фасонных деталей.....	75
2.7. Выбор метода обработки: фрезерование как перспективный способ восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей.....	78
2.8. Выводы по главе 2.....	78

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СБОРНЫХ ФРЕЗ

3.1. Блок-схема системы автоматизированного проектирования сборной фасонной фрезы с СМП.....	80
3.2. Разработка методики (алгоритма) расчета и проектирования конструктивных элементов сборной фасонной фрезы	84
3.2.1. Разработка алгоритма расчета геометрических параметров	84
3.2.2. Определение положения режущих пластин в ноже и расположения ножей в корпусе сборной фасонной фрезы	85
3.3. Исследование влияния конструктивных параметров сборной фасонной фрезы на процесс фрезерования профиля катания колесных пар	91
3.3.1. Анализ равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами	91
3.3.2. Исследование точности и шероховатости обработанной поверхности профилей катания колесных пар	100

3.4. Совершенствование конструкции сборной фрезы для повышения стойкости и производительности обработки фасонных деталей	107
3.4.1. Обоснование выбора конструктивных параметров сборной фрезы..	107
3.4.2. Обоснование выбора геометрических параметров сборной фрезы...	109
3.4.3. Теоретический анализ формирования остаточной микрогеометрии при фрезоточении	112
3.4.4. Определение кинематических задних углов и параметров срезаемого слоя сборных дисковых фрез с СМП при обработке фасонных деталей мобильных колесных платформ	117
3.5. Выводы по главе 3.....	126
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СБОРНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ	128
4.1. Способ обработки колесных пар с использованием сборной фрезы.....	128
4.2. Комбинированный способ обработки профиля катания колесных пар ...	129
4.3. Описание технологической системы для обработки фасонных деталей с использованием сборной дисковой фрезы	131
4.4. Выводы по главе 4.....	133
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СБОРНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ.....	135
5.1. Постановка задачи исследования по обработке профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ	135
5.2. Планирование эксперимента по обработке профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ	135
5.3. Анализ полученных экспериментальных данных по фрезерованию профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ.....	137
5.3.1. Анализ силовых и энергетических характеристик процесса фрезерования катания колесных пар мобильных колесных платформ.....	137

5.3.2. Анализ шероховатости поверхности обработанной колесной пары .	138
5.4. Сравнительный анализ результатов фрезерования сборной дисковой фрезой и токарной обработки профиля катания колесных пар	140
5.5. Сравнительная оценка стойкости и общей эффективности применения тангенциальных и радиальных пластин	142
5.6. Выводы по главе 5.....	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
Приложение 1	164
Конструкторско-технологическая документация сборной дисковой фрезы	164
Приложение 2	172
Сведения, предоставленные промышленными предприятиями	172
Приложение 3	174
Акт приемки и внедрения	174
Приложения 4.....	177
Достижения.....	177

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении особое значение имеет обработка изделий, имеющих сложный профиль поперечного сечения – например, деталей мобильных колесных платформ, к которым относятся колесные пары подвижного состава и ходовых систем грузоподъемного оборудования, а также головки направляющих рельсов и острижков стрелочных переводов, по которым перемещаются мобильные колесные платформы. Эти элементы подвержены интенсивному износу в процессе эксплуатации и требуют регулярного восстановления с помощью операций механической обработки с соблюдением строгих требований к точности, качеству и ресурсу обработанной поверхности. При этом особое значение приобретает стойкость применяемого режущего инструмента, от которой напрямую зависят стабильность процесса, производительность обработки и затраты на восстановление инструмента.

Одним из перспективных направлений при обработке фасонных деталей является использование сборных фрез со сменными многогранными пластинами (СМП), обладающих высокой производительностью, возможностью адаптации под заданный профиль и ремонтпригодностью. Однако при обработке фасонных поверхностей, особенно в условиях неравномерного припуска и переменной твердости материала, ключевой задачей становится обеспечение долговечности инструмента без потери точности. Существующие конструкции фрез нередко демонстрируют недостаточную стойкость вследствие нерационального распределения нагрузок на режущие элементы и неравномерного износа пластин.

Кроме того, в ряде случаев применяются токарные резцы с СМП, однако при обработке сложных профилей они уступают фрезерным инструментам по стойкости, особенно при прерывистом резании или работе с изношенными участками поверхности. Сборные фасонные фрезы с СМП обеспечивают высокое качество обработки, но имеют ограничения по сложности настройки, массе и стоимости, что затрудняет их широкое внедрение.

В связи с этим актуальной задачей становится разработка новых конструкций сборных фрез, обладающих высокой стойкостью при обработке фасонных деталей. Это требует обоснования рациональных конструктивных решений, выбора оптимальной геометрии режущих кромок и определения условий их эффективного применения.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью повышения стойкости сборных фрез с СМП при обработке фасонных деталей мобильных колесных платформ, в том числе профилей катания колесных пар, что особенно важно при восстановлении изношенных участков, подверженных интенсивным контактными нагрузкам. Повышение стойкости инструмента позволяет существенно сократить затраты на переналадку, увеличить межсменный ресурс обработки, снизить расход сменных пластин и повысить эффективность технологического процесса в целом.

Степень разработанности темы. Вопросами конструктивного совершенствования фрез, выбора формы и расположения пластин для повышения стойкости сборных фрез с СМП 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., Sładkowski A. и другие.

Значительный вклад в разработку методик оценки износостойкости 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 в области проектирования и применения сборных фрез с СМП, остаются слабо проработанными вопросы, связанные с обеспечением высокой стойкости инструмента при обработке фасонных участков, характерных для деталей с изношенными поверхностями. Недостаточно изучено влияние неравномерного распределения нагрузки по режущим крокам и

конструктивных решений, направленных на равномерный износ пластин. Кроме того, требует дальнейшей проработки комплексный подход к сочетанию конструкции инструмента и условий его применения в целях повышения ресурса и стабильности обработки. Эти обстоятельства определяют необходимость углубленных исследований, направленных на разработку новых конструкций фрез и способов их применения с целью повышения стойкости инструмента и эффективности технологического процесса восстановления фасонных поверхностей в машиностроении.

Цель работы. 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, объединяющая черновое шлифование и фрезерование или точение, что позволяет повысить стойкость режущего инструмента и эффективно восстанавливать геометрию поверхности катания колесных пар (Патент на изобретение РФ [79]);
2. Рекомендации 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 и Евразия [52, 78]);
3. Рекомендации 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 [77]);
4. Рекомендации 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 [56]);

5. Новые конструкции сборных фрез с СМП для восстановления фасонных деталей (Патенты на полезные модели РФ [58, 61, 62, 64]);

6. Алгоритм 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.

7. Алгоритм расчета остаточных неровностей после обработки фасонных деталей сборными фасонными фрезами с СМП, что позволяет повысить качество обработки (Свидетельство на программу для ЭВМ [84]);

8. Алгоритм расчета неравномерности фрезерования фасонных деталей сборными фасонными фрезами с СМП, обеспечивающий стабильность процесса резания и равномерное снятие материала (Свидетельство на программу для ЭВМ [86]);

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

10. Рекомендации 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 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 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;

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

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

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

- соответствием полученных результатов требованиям нормативной документации [10, 19] 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) [51];

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

- на 15-й Международной научно-технической конференции «Научоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2024) [48];

- на 37-й Международной научно-технической конференции «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (Минск, 2023) [47];

- 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.

Структура и объем 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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

1.1. Технические требования к конструкции головки рельсов мобильных колесных платформ

Рельсы являются важнейшими направляющими элементами транспортных и подъемно-транспортных систем, обеспечивающими устойчивость и точность перемещения мобильных колесных платформ. В зависимости от области применения, условий эксплуатации и конструктивных особенностей рельсы подразделяются на различные виды, каждый из которых обладает специфическими характеристиками, определяющими их функциональное назначение. Ниже представлены основные виды рельсов:

1. Рельсы типов РП50, РП65, РП75 применяются на ширококолейных путях, включая участки со стрелочными переводами на промышленных предприятиях.

2. Железнодорожные рельсы узкой колеи (Р8, Р11, Р18, Р24) используются в системах с ограниченным габаритом, в том числе в шахтах.

3. Шахтные рельсы (Р33, Р38, Р43) применяются на соединительных путях и в системах непрерывного рельсового транспорта.

4. Крановые рельсы (КР70, КР80, КР100, КР120, КР140) предназначены для перемещения подъемных кранов и крановых тележек.

5. Остряковые рельсы (ОР43, ОР50, ОР65, ОР75) применяются при формировании путей широкой колеи на магистралях, в метро и на промышленном транспорте.

6. Контррельсы (РК50, РК65, РК75) служат элементами защиты в верхнем строении пути. Концы изгибаются под углом 45° , зазор между контррельсом и основным рельсом не должен превышать 90 мм.

7. Рамные рельсы (РР65) используются в пересечениях и соединениях путей, где устанавливаются острия. Для компенсации нагрузки применяются упорные болты.

8. Желобчатые трамвайные рельсы (Т58, Т62, Т60, Т65) предназначены для городского электротранспорта. Обладают повышенной износостойкостью и специфическим профилем головки, включающим желоб под гребень колеса.

Головка рельса имеет выпуклый сложный фасонный профиль, обеспечивающий равномерное распределение контактных напряжений от колеса. Шероховатость поверхности головки рельса составляет $Rz = 7$ мкм, а боковых граней – $Rz = 15$ мкм. На рис. 1.1 приведены чертежи сечений рельсов типов РП50 и КР100. Остальные типоразмеры рельсов представлены в нормативной документации: для железнодорожных рельсов – в ГОСТ Р 51685-2013 [19], для крановых рельсов – в ГОСТ Р 53866-2010 [21].

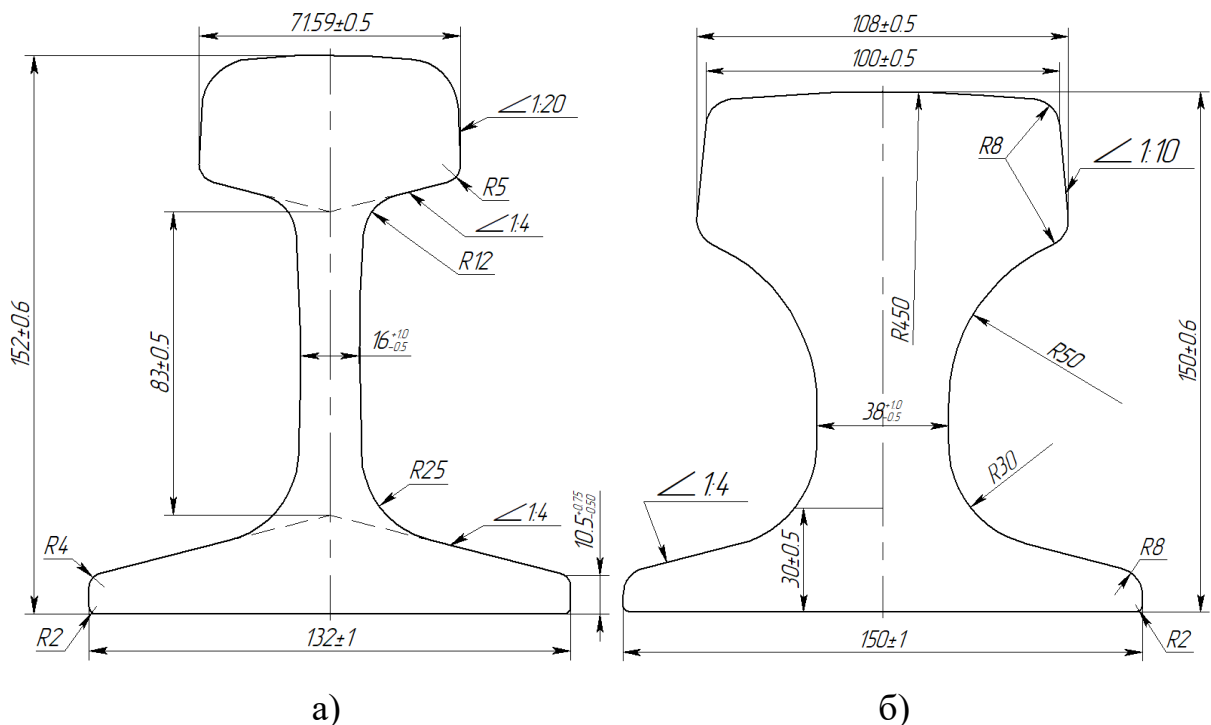


Рис. 1.1 – Профили железнодорожных (а) и крановых (б) рельсов.

Поверхность рельса должна быть без следующих дефектов: раскатанных загрязнений, трещин, разрывов, раскатанных корочек, закатов, раковин от окалины, подрезов, вмятин, а также поперечных рисок и царапин.

Для производства рельсов типов РП50, РП65 и РП75 используют различные

марки стали. Химический состав стали приведен в табл. 1.1.

Крановые рельсы изготавливают из углеродистой стали марки 63. Химический состав стали приведен в табл. 1.2.

Таблица 1.1

Химический состав стали рельсов типов РП50, РП65 и РП75.

Марка стали	% доля элементов								
	C	Mn	Si	V	Cr	N	P	S	Al
							Не более		
90ХАФ	0.83-0.95	0.75-1.25	0.25-0.6	0.08-0.15	0.2-0.6	0.01-0.02	0.02	0.02	0.04
76ХАФ	0.71-0.82			0.05-0.15	0.2-0.8				
76ХФ				0.03-0.15					
76ХСФ	0.71-0.82		0.3-1.1	0.05-0.15	0.5-1.25	—			
90АФ	0.83-0.95		0.25-0.6	0.08-0.15	—	0.01-0.02			
76АФ	0.71-0.82			0.05-0.15					
76Ф				0.03-0.15		—			

Таблица 1.2

Химический состав стали крановых рельсов.

% доля элементов							
C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu
			Не более				
0.53-0.73	0.6-1	0.15-0.35	0.035	0.04	0.3	0.3	0.3

В табл. 1.3 представлены твердость поверхности рельсов [19] по точкам (рис. 1.2). Отклонения расположения точек: ± 1 мм, $\pm 3^\circ$.

Таблица 1.3

Твердость поверхности рельсов.

Поверхность	Твердость, НВ
На поверхности катания головки (т.1)	от 370 до 402
На глубине 10 мм от поверхности катания головки по вертикальной оси рельса (т.2)	≥ 363
На глубине 10 мм от поверхности выкружки рельса (т.3 и 4)	≥ 341
На глубине 22 мм от поверхности катания головки по вертикальной оси рельса (т.5)	≥ 352
В шейке и подошве (т.6-8)	≤ 388
Разность значений твердости на поверхности одного рельса не должна превышать 30 НВ	

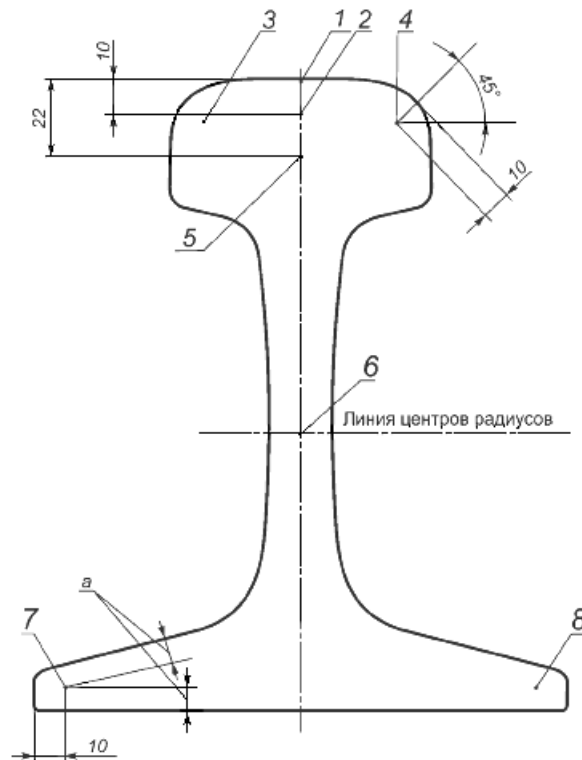


Рис. 1.2 – Точки измерения твердости рельсов.

1.2. Технические требования к конструкции профиля острия стрелочных переводов

Острия стрелочных переводов – это подвижные элементы рельсовой системы, обеспечивающие плавный перевод колесной пары с одного направления пути на другое (рис. 1.3). Они представляют собой специально обработанные участки рельсов, прижимаемые к рамным рельсам с целью перенаправления движения подвижного состава. Шероховатость рабочей поверхности острия составляет $Rz = 7$ мкм.

В зависимости от конструкции, марки стали и вида термообработки различают несколько типов остриков [18]:

1. Острики типа П3320 обладают повышенной прочностью и износостойкостью за счет односторонней заковки с предварительным упругим изгибом. Изготавливаются из сталей марок К73Ф, К73ГФ, Э73Ф и Э73ГФ. Твердость поверхности катания составляет 321-388 НВ, что обеспечивает

долговечность и устойчивость к интенсивному износу в условиях эксплуатации.

2. Остряки типа ДЗ350 производятся из сталей Э76Ф, К76ХСФ и Э76ХСФ с двухсторонней закалкой, но без упругого изгиба. Повышенная твердость поверхности (в пределах 350-401 НВ) гарантирует высокую прочность и стойкость к износу при эксплуатации.

3. Остряки типа НТ320 изготавливаются из тех же сталей, что и тип ДЗ350, но без обязательного термического упрочнения. Твердость поверхности составляет 321-388 НВ, что обеспечивает достаточный ресурс при эксплуатации даже без дополнительной закалки.

Выбор типа остряка определяется интенсивностью нагрузок, характером износа и требованиями к ресурсу стрелочного перевода.

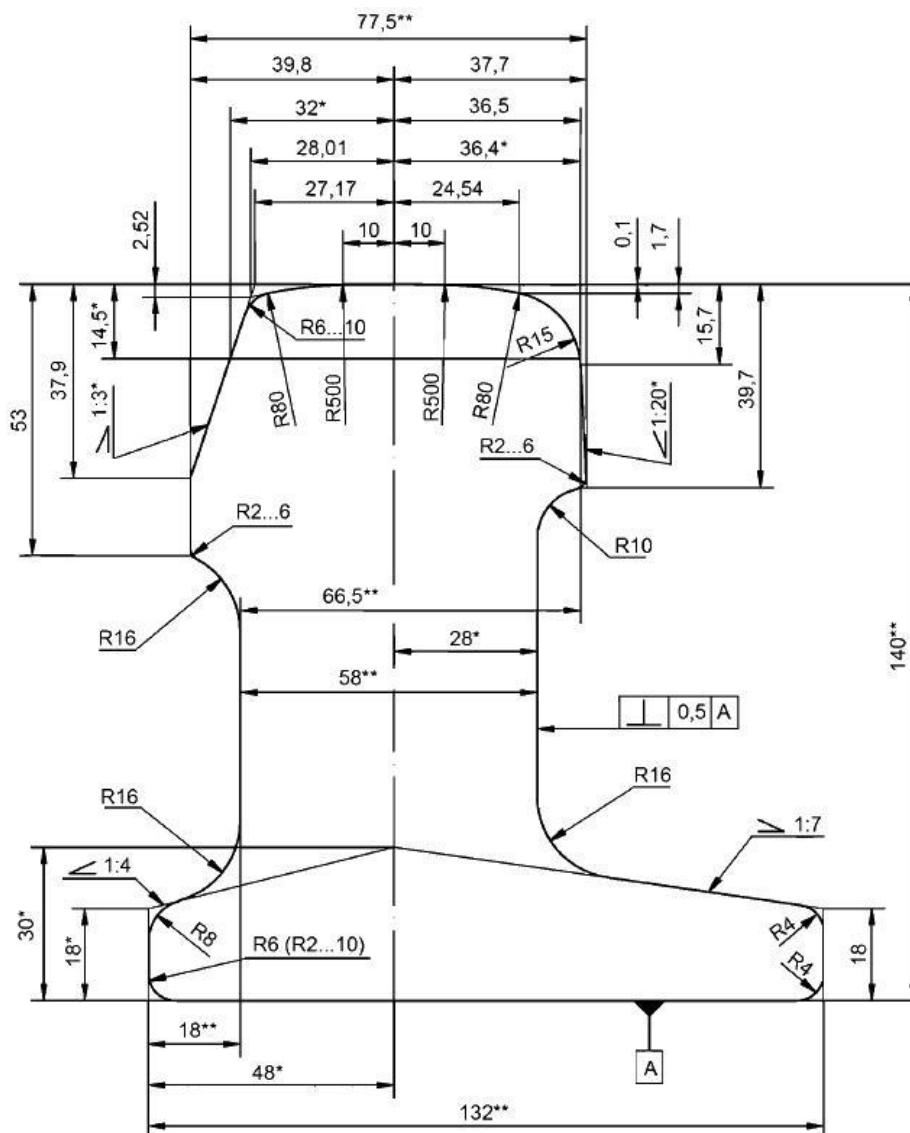


Рис. 1.3 – Профиль сечения остряка стрелочных переводов.

1.3. Технические требования к конструкции профиля катания колесных пар

Колеса, применяемые в транспортных и подъемно-транспортных системах, являются элементами, воспринимающими и передающими внешние нагрузки на направляющие элементы (рельсы), обеспечивая устойчивое и точное движение мобильных колесных платформ, тележек, вагонов и кранов. В зависимости от области применения профили катания колес могут различаться по геометрии, характеристикам шероховатости, типу обработки и материалу изготовления.

Колесная пара мобильного транспорта представляет собой конструктивный узел, состоящих из двух колес, жестко закрепленных на общей оси, обеспечивающей их совместное вращение. Профиль катания колес имеет фасонную профиль (рис. 1.4, а) с наличием гребня, предотвращающего сход с рельсов при движении по кривым участкам и стрелочным переходам.

Дополнительно может использоваться черновая бандаж (рис. 1.4, б) – съемный защитный элемент, монтируемый на обод колеса для увеличения ресурса и перераспределения нагрузок. Он подлежит термической и механической обработке после формообразования.

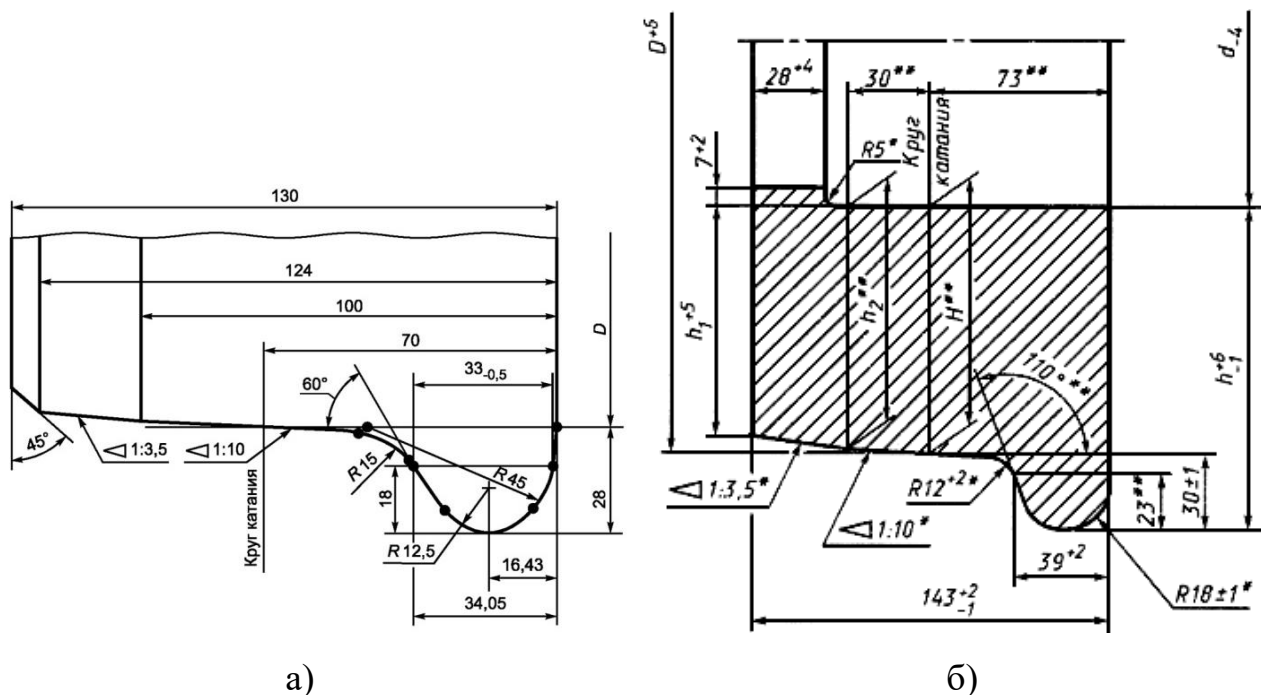


Рис. 1.4 – Профиль катания колеса МВПС (а) и черновой бандаж (б).

Шероховатость поверхности катания по ГОСТ [10, 20] составляет не более $Ra \leq 10$ мкм для скоростей до 200 км/ч и $Ra \leq 6.3$ мкм для скоростей выше 200 км/ч.

Допускаемое расхождение диаметров колес в пределах одной колесной пары составляет до 0.5 мм (при скорости до 200 км/ч) и до 0.3 мм (при скорости выше 200 км/ч).

Колеса и бандажи изготавливаются из сталей марок Ст2 и Ст4, применяемые в зависимости от типа подвижного состава (пассажирский, маневровый, грузовой). Геометрические параметры и физико-механические свойства бандажей приведены в таблицах 1.4–1.7.

Таблица 1.4

Габаритные размеры чистового и черного бандажа.

Внутренний диаметр чернового бандажа d , мм	Диаметр по кругу катания D , мм в		Масса чернового бандажа, кг	Диаметр по кругу катания D , мм, в		Масса чернового бандажа, кг
	Черн. виде	Чист. виде		Черн. виде	Чист. виде	
	При толщине черн. бандажа 83 мм			При толщине черн. бандажа 98 мм		
1690	1856	1850	585	–	–	–
1340	1506	1500	470	–	–	–
1240	1406	1400	437	–	–	–
1160	1326	1320	411	1356	1350	482
1090	1256	1250	386	–	–	–
1060	1226	1220	378	1256	1250	444
1010	–	–	–	1206	1200	425
940	–	–	–	1126	1120	378
890	1056	1050	322	1086	1080	380
790	956	950	289	–	–	–
740	906	900	273	–	–	–
690	856	850	256	–	–	–
620	786	780	233	–	–	–

Таблица 1.5

Толщина черного и чистового бандажа.

Толщина чистового бандажа	Толщина черного бандажа			
	H	h	h ₁	h ₂
75	83	113	75.8	81.5
80	88	118	80.8	86.5
85	93	123	85.8	91.5
90	98	128	90.8	96.5

Таблица 1.6

Химический состав стали бандажей.

Марка стали	Массовая доля элементов, %						
	C	Mn	Si	Cr	V	P	S
					Не более		
Ст2	0.57-0.65	0.6-0.9	0.22-0.45	≤ 0.2	0.15	0.03	0.02
Ст4	0.65-0.75			0.2-0.6			

Таблица 1.7

Физико-механические свойства бандажей.

Марка стали	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²	Относ. удлинение, %	Относ. сужение, %	Твердость, НВ		Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²	
				На глубине 20 мм	На гребне, не менее	+20°C	-60°C
		Не менее		Не менее		Не менее	
Ст2	930-1110	10	14	≥ 269	321	25	15
Ст4	≥ 1050	9	12	320-360	380	20	

Крановые колеса применяются в составе ходовых систем грузоподъемного оборудования машиностроительных предприятий. Они обеспечивают перемещение крана по рельсовому пути, воспринимая значительные вертикальные и горизонтальные нагрузки. Надежность и ресурс работы крана во многом определяются качеством исполнения крановых колес.

Согласно ГОСТ 28648-90 [16], крановые колеса изготавливаются двух типов: К2Р – двухребордные (рис. 1.5, а) и К1Р – одnoreбордные (рис. 1.5, б). В табл. 1.8 представлены габаритные размеры крановых колес.

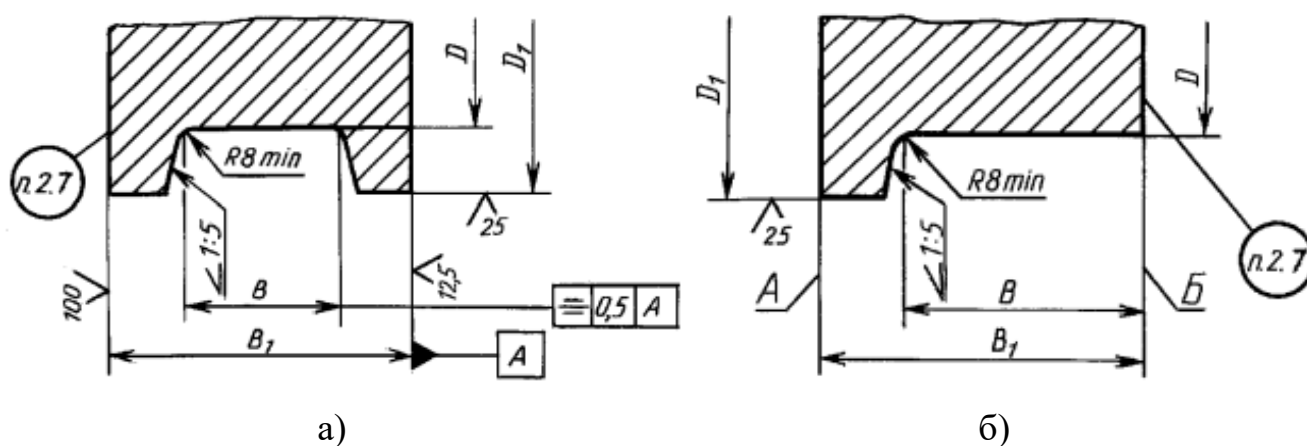


Рис. 1.5 – Крановые колеса: двухребордные (а) и одnoreбордные (б).

Крановые колеса изготавливаются из стали марки 75 или 65Г по ГОСТ

14959-2016 [11]. Допускается изготовление колес из стали 2 по ГОСТ 10791-2011 [9], а также из других марок сталей с механическими характеристиками не ниже чем стали 45.

Твердость поверхности катания и реборд, изготовленных из сталей марок 75 и 65Г, составляет 320-390 НВ. Шероховатость поверхности катания колеса составляет $R_a = 6.3$ мкм.

Таблица 1.8

Размеры крановых колес.

Диаметр колеса D, мм	Диаметр колеса с учетом реборды D ₁ , мм	Ширина поверхности катания B, мм	Ширина колеса B ₁ , мм	Масса, кг
Двухребордные колеса				
200	230	60	90	15
250	290	70	110	30
320	360	80	120	50
400	450	80	130	80
		90	140	80
		100	150	90
500	550	90	150	145
		100		
560	600	90	130	200
		100	150	210
630	680	90	140	220
		100	150	250
710	770	100	150	300
		130	180	380
		150	200	410
800	880	110	170	330
		130	190	360
		150	210	410
		170	250	640
900	980	130	190	460
		150	210	530
		170	250	630
1000	1080	170	250	890
Однорребордные колеса				
200	230	60	75	11
250	290	70	90	20
320	360	80	100	31
400	450	106	130	61
500	550	125	150	113

1.4. Анализ способов восстановления рабочих поверхностей колесных пар

Рабочие поверхности фасонных изделий машиностроения, особенно таких элементов, как колеса, рельсы, элементы тележек и рам, в процессе эксплуатации подвергаются интенсивному износу, пластическим деформациям, усталостным разрушениям, сколам и другим видам повреждений. Для продления срока службы и минимизации затрат на замену компонентов применяются различные способы восстановления.

Выбор способа восстановления зависит от:

- степени износа и характера повреждения;
- требований к прочности и геометрии восстановленной поверхности;
- особенностей материала;
- экономической целесообразности и технологических возможностей.

Примером может служить износ рабочих поверхностей колесных пар, характерных для производственных тележек, технологического транспорта и мобильных колесных платформ. На рис. 1.6 приведены характерные дефекты поверхности: ползун (а), остроконечный накат гребня (б), выщербина (в).



а)

б)

в)

Рис. 1.6 – Ползун (а), остроконечный накат гребня (б), выщербина (в).

В табл. 1.9 приведены виды и величина износа бандажей колесных пар при различных условиях использования в эксплуатации. Исходя из вида износа, ее глубины и длины, определяют величину срезаемого слоя при обработке бандажей колесных пар.

Виды и величины износа профиля катания колес.

№	Вид износа	Вагоны дальнего следования		Мотор-вагонный подвижной состав		Грузовой и Рефрижераторный ПС	
		до 120 км/ч	120-140 км/ч	до 120 км/ч	120-140 км/ч	до 120 км/ч	120-140 км/ч
1	Прокат	7 мм	5 мм	8 мм	–	9 мм	–
2	Толщина проката	33...25 мм	33...28 мм	33...25 мм	33...28 мм	33...25 мм	
3	Толщина обода	90...25 мм	90...35 мм	90...25 мм	90...35 мм	90...22 мм	
4	Выщербина	Глубиной 10 мм или длиной > 50 мм		Глубиной 10 мм или длиной > 25 мм			
5	Кольцевые выработки	Глубиной 1 мм или длиной > 15 мм				Глубиной 2 мм или длиной > 15 мм	
6	Навар	1...2 мм					
7	Ползун	1...12 мм (тах скорость передвижения поездов при ползуне > 12 мм составляет 10 км/ч)					
8	Остроконечный накат гребня	Недопустим					

На машиностроительных предприятиях применяются следующие основные способы восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей:

1. Обработка резанием – механическое удаление изношенного слоя металла (точение, фрезерование, шлифование и т.д.). Используется при восстановлении колес, рельсов, острияков стрелочных переводов и т.п.

2. Наплавка (восстановительная сварка) – нанесение слоя металла на изношенную поверхность с помощью сварки (дуговая, порошковая, лазерная, плазменная и др.) и последующей механической обработкой. Применяется при глубоком износе, наличии трещин, сколов, дефектов геометрии и т.п.

3. Термическое упрочнение рабочих поверхностей для повышения их твердости и износостойкости без существенного изменения размеров за счет нагрева и быстрого охлаждения. Применяется для упрочнения рельсов, острияков стрелочных переводов, гребней колесных пар и т.п.

4. Гальваническое восстановление размеров за счет электрохимического

нанесения металлических покрытий. Применяется для восстановления посадочных мест осей, валов и т.п., где нужна высокая точность, тонкие слои и небольшие отклонения размеров.

5. Плазменное напыление металлических либо керамических частиц для защиты и упрочнения рабочих зон (например, колес, ободов, элементы рам тележек и т.п.).

6. Клеевое восстановление применяется для восстановления геометрии и работоспособности. Применяется при временном ремонте трещин рам тележек, второстепенных деталей, не несущих больших нагрузок и т.п.

В табл. 1.10 представлена сравнительная характеристика способов восстановления [42, 70, 74, 79].

На основании анализа установлено, что при незначительном износе целесообразно применять механическую обработку, гальваническое восстановление или термическое упрочнение. В случае глубокой выработки предпочтительна наплавка с последующей механической обработкой. Для повышения ресурса деталей следует сочетать механическую обработку с последующим упрочнением рабочих поверхностей.

Таблица 1.10

Сравнительная характеристика способов восстановления.

Способ восстановления	Степень восстановления	Стойкость	Затраты	Требуемая обработка после восстановления
Обработка резанием	Небольшой износ	Высокая	Средние	Минимальная (иногда полировка)
Наплавка	Большой износ	Очень высокая	Высокие	Обязательная механическая обработка
Термическое упрочнение	Износ без утрат металла	Очень высокая	Средние	Легкая полировка
Гальваническое восстановление	Малый и средний износ	Средняя	Средние	Минимальная
Плазменное напыление	Средний износ	Ниже средней	Средние	Легкая обработка
Клеевое восстановление	Малый износ	Низкая	Низкие	Обычно не требуется

1.5. Критический анализ работ по проектированию режущих инструментов, применяемых в машиностроении

Для обоснования актуальности и направления дальнейших исследований проведен анализ кандидатских и докторских диссертаций, а также научных статей, с целью выявления общих и отличительных черт работ, посвященных проектированию и применению режущих инструментов, в том числе сборных фрез с СМП для обработки фасонных изделий машиностроения.

Кандидатская диссертация Т.Г. Буньковой [6] посвящена увеличению ресурса пары «колесо – рельс» за счет оптимального подбора твердости материалов. Исследуется влияние твердости сталей на износостойкость с целью минимизации износа и продления срока службы. Проведены анализ дефектов, экспериментальные исследования и моделирование износа. Разработанные модели позволяют обосновать оптимальные диапазоны твердости, обеспечивающие увеличение межремонтного пробега и снижение эксплуатационных затрат.

С точки зрения обработки фасонных поверхностей режущими инструментами, включая сборные фрезы с СМП, диссертация представляет практический интерес в части изучения закономерностей износа при высоких контактных давлениях и переменных нагрузках. Основные выводы относительно влияния твердости на устойчивость к износу могут быть адаптированы при выборе параметров сборных фрез и обосновании их конструкции с учетом стойкости в условиях интенсивной эксплуатации.

Диссертационная работа С.А. Чевычелова [91] посвящена повышению эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием для репрофилирования головки рельсов. Решение позволяет использовать в сборных фасонных фрезах оснащения СМП с прямолинейной режущей кромкой. За счет обеспечения непрерывности процесса резания и соответствующего расположения СМП под углами, повышается плавность обработки. На основе выполненной работы были разработаны новые способы, а

также конструкции фрез и абразивных кругов для черновой и чистовой обработки головки рельсов [53, 63, 65, 80]. Однако изготовление таких сборных фрез является сложным и трудоемким. Также требуется опытный персонал для сложной настройки вне станка и дополнительное оборудование, т.к. масса одной сборной фасонной фрезы в сборе будет составлять примерно 50 кг. А при обработке абразивными кругами снижается производительность черновой обработки из-за характера и глубины износа фасонных изделий.

Докторская диссертация С.В. Лукиной [43] посвящена повышению эффективности проектирования сборного режущего инструмента за счет установления взаимосвязей между конструкционными, технологическими и экономическими параметрами. В работе представлена методология проектирования, включающая построение объектно-ориентированных моделей конструкции, моделирование напряженно-деформированного состояния сборного режущего инструмента, анализ температурных и динамических факторов, а также оценку прочности, жесткости и влияния геометрических параметров на эксплуатационное поведение сборного режущего инструмента. Дополнительно разработаны технико-экономическая и оптимизационная модели, обеспечивающие выбор рациональных параметров конструкции на стадии проектирования. Полученные подходы могут служить методологической основой для развития проектирования сборной фасонной фрезы с СМП.

Кандидатская диссертационная работа А.И. Веселова [7] посвящена повышению эффективности проектирования сборных фрез для обработки деталей сложного профиля на основе математического моделирования. В работе представлена геометрическая модель конструкции, устанавливающая зависимости между относительными поворотами и перемещениями координатных систем, что позволило разработать методы определения параметров расположения СМП и предложить схему ориентации корпуса фрезы для обработки пазов под СМП на станке с ЧПУ. Также в работе выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния сборных фрез, в котором учитывались реальные положения пластин, силы резания и

крепления, деформации корпуса и стыков. На основе численного моделирования определено влияние геометрических и конструктивных параметров на жёсткость инструмента, установлены наиболее значимые параметры режущей части и получены аналитические зависимости перемещений режущей кромки под действием сил резания, что обеспечивает возможность корректного учёта деформаций при проектировании.

Однако практическое применение предложенных методов проектирования в условиях машиностроительных предприятий ограничено высокой сложностью математического описания и необходимостью точной настройки оборудования. Реализация требует специализированного программного обеспечения и высококвалифицированного персонала, что увеличивает затраты и временные ресурсы на подготовку производства, снижая рентабельность при серийном выпуске и ремонтно-восстановительных операциях.

Диссертационная работа С.В. Борисова [5] посвящена повышению качества обработки сложных фасонных поверхностей за счет применения фрез с винтовым зубом на криволинейной поверхности. Предложена модель определения параметров установки дискового инструмента для обработки стружечных винтовых канавок на фасонной поверхности концевых фрез, а также механизм создания объемной геометрической модели формообразующей поверхности фасонных концевых фрез. Однако применение конструкций фасонных концевых фрез не соответствует требованиям обработки крупногабаритных изделий машиностроения из-за существенных недостатков по сравнению с составными конструкциями. Например, за счет отсутствия СМП, снижается стойкость режущего инструмента, что требует периодической переточки изношенных режущих зубьев, что на сегодняшний день неэффективно с экономической точки зрения.

Кандидатская диссертация Д.А. Бобрышева [4] посвящена разработке методов расчета точности сборных фасонных фрез на основе пространственного моделирования. Разработанная геометрическая модель позволяет рассчитать точность размеров профиля и производящей поверхности сборных фасонных

фрез, включая положение пазов под СМП. В работе был разработан метод расчета точности инструмента на этапах проектирования и конструирования, а также система расчета точности размеров гиперболических фрез, сокращая сроки проектирования. Также создан комплекс моделирования образования погрешностей размеров, позволяющий определить рациональные значения параметров точности размеров инструмента.

Диссертационная работа П.М. Терехова [89] посвящена определению рациональных параметров восстановления профиля бандажей колесных пар с учетом твердости термомеханических повреждений на поверхности катания. Разработана математическая модель и методика расчета для оптимизации процесса восстановления, подтвержденные экспериментально. Это позволило более точно определять параметры процесса и учитывать износостойкость режущего инструмента. Также проведен анализ влияния параметров восстановления на радиальное биение поверхности, важное для качества ремонта.

Кандидатская диссертация А.О. Гладышкина [8] посвящена созданию быстропереналаживаемых сборных фрез и технологии их применения для восстановления колесных пар. Разработан новый подход к автоматизированному проектированию фрез для восстановления колесных пар. Методика позволяет увеличить количество восстановлений и снизить расход материалов. Применение этого подхода сокращает сроки подготовки производства и увеличивает загрузку оборудования.

Рассмотренные диссертации частично решают проблему проектирования и оптимизации сборных фасонных фрез с СМП для обработки колесных пар. Остаются нерешенными задачи настройки фрез из-за их массы, необходимость переналадки для обработки разных профилей и высокая стоимость изготовления комплектов фрез, включая правое и левое исполнения.

Кандидатская диссертация И.В. Чулина [92] посвящена проектированию и использованию сборных фасонных фрез с СМП. В работе предпринята попытка решить задачу повышения эффективности обработки деталей сложного профиля (например, острияки), выполненных из закаленных сталей и других

труднообрабатываемых материалов, за счет совершенствования конструкции фрез, оптимизации параметров резания и моделирования технологических погрешностей. Однако в диссертации не уделено достаточного внимания вопросу обработки профилей колесных пар и головки рельсов. Обработка данных элементов требует высокой точности, стойкости режущего инструмента и устойчивости процесса резания в условиях переменных нагрузок. Отсутствие анализа в данной области может ограничить применение разработанной сборной фасонной фрезы в ключевом сегменте машиностроения, где задачи восстановления и обработки профилей катания и рельсовых головок имеют первостепенное значение.

Кандидатская диссертация А.В. Исаева [34] посвящена разработке сборных фрез с СМП, расположенными на винтовой поверхности для обработки сложных профилей заготовок. В работе предложены математические модели дискретной режущей кромки и формообразующей части фрезы, а также алгоритмы для проектирования и установки пластин на корпусе инструмента. Разработанные решения позволяют снизить вибрации, повысить равномерность резания и стойкость режущих кромок при обработке сложных профилей. Однако в работе недостаточно раскрыты вопросы адаптации конструкции сборных фасонных фрез с СМП к обработке таких специфических деталей, как колесные пары и головки рельсов, что ограничивает ее применение в соответствующих отраслях машиностроения.

Кандидатская диссертация М.И. Бисерикана [3] посвящена обеспечению работоспособности колес грузовых вагонов в условиях повышенных динамических нагрузок. Исследовано влияние макрогеометрии поверхности катания на контактно-усталостное разрушение и износ с использованием математического моделирования для прогнозирования ресурса колесных пар. Предложена технология восстановления профиля колеса лазерно-механической обработкой, улучшая качество поверхности и продлевая срок эксплуатации. Однако технология требует значительных энергозатрат и может изменить структуру металла при недостаточной точности, снижая его прочность.

Технология эффективна для устранения поверхностных дефектов и может быть непригодна для сильно поврежденных колес.

Кандидатская диссертация Сан Маунга [83] посвящена повышению эффективности процессов изготовления и восстановления колесных пар подвижного состава для железных дорог Мьянмы. Основное внимание уделено колесотокарной обработке, формированию профиля поверхности катания колес и факторам, влияющим на износостойкость режущего инструмента. В работе исследованы закономерности износа пластин, разработаны математические модели температурных полей и предложены конструкции инструмента с улучшенным теплоотводом.

Однако, хотя математические модели позволяют определить тепловые нагрузки и прогнозировать износ, они не решают проблему быстрого изнашивания инструмента. Высокие температуры и усилия резания приводят к быстрому износу резцов, требующему частой замены и снижению производительности, что ограничивает длительную и непрерывную работу при больших объемах обработки.

Кандидатская диссертация С.Л. Плавник [81] посвящена повышению надежности фасонного фрезерования путем уменьшения колебаний для улучшения точности и качества обработки. Автор разрабатывает математические модели технологической системы, анализирует автоколебания и вынужденные колебания, оптимизируя режимы резания. Экспериментальная проверка и внедрение показали улучшение качества и надежности процесса.

Применение предложенных методов может быть полезным, но требует адаптации к условиям обработки профилей колесных пар, включая усиление виброустойчивости и повышение надежности сборных фрез в условиях значительных нагрузок и интенсивной эксплуатации.

Кандидатская диссертационная работа А.Н. Шитикова [93] посвящена повышению производительности обработки валов с равноосным контуром сборными фасонными фрезами с СМП. В работе представлен метод проектирования сборных фасонных фрез, основанный на геометрической теории

формирования поверхностей. Разработана геометрическая модель конструкции фрезы и методика расчета пространственной установки СМП на корпусе фрезы с определением точек режущих кромок.

Докторская диссертация В.В. Куца [41] посвящена разработке методологии предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем для обеспечения заданной точности обработки валов с равноосным контуром. Методология позволяет разрабатывать варианты структур формообразующей системы и их связи, преобразуя их в размерные и свойства материалов звеньев. Разработаны способы обработки валов и конструкции сборных фасонных фрез с СМП [54, 55], не требующие гармонических перемещений заготовки и инструмента.

Однако проектирование вышеописанных сборных фасонных фрез с СМП является трудоемким и затратным. Ресурс таких фрез ограничен, т.к. при выходе из строя одного паза в цельном корпусе требуется замена всего корпуса, что не является эффективным. Составной корпус в данном случае является более экономичным решением, так как исключает необходимость полной замены цельного фасонного корпуса.

Докторская диссертация В.А. Гречишникова [23] представляет собой значимый вклад в область проектирования режущих инструментов и разработки моделей САПР, ориентированных на создание инструмента для обработки деталей сложной формы. Предложенная модель организации САПР позволяет учитывать особенности формирования поверхностей инструмента и генерации профилей для различных видов обработки.

Кандидатская диссертация Д.Д. Евсеева [31] посвящена увеличению срока службы сборных фасонных фрез для обработки колесных пар с неоднородной микротвердостью. Для достижения равномерности фрезерования было разработано устройство крепления фрезы, которое самоадаптируется к неоднородности материала. Однако конструктивные особенности фрез с СМП ($z=10$) не позволяют полностью обеспечить равномерность обработки, а лишь минимизируют прерывистость входа и выхода зубьев в контакт с поверхностью заготовки.

Для решения данной проблемы Д.Д. Евсеев разработал конструкцию адаптирующейся фрезы для обработки профиля колесных пар [59]. Цель – расширение технологических возможностей обработки тел вращения и сложных поверхностей на станках с ЧПУ и копиров. По заявлению автора фреза с плавающими элементами снижает ударные нагрузки и уменьшает износ инструмента. Однако данное решение усложняет конструкцию инструмента и настройки, что может повысить стоимость и снизить производительность. При изменении характеристик материала колес или неравномерном износе фреза может требовать дополнительных регулировок, так как рассчитана на работу с колесами определенной твердости (289 НВ).

Статья А.А. Раубы, А.Ю. Попова и Д.В. Муравьева [82] посвящена снижению затрат на инструмент при ремонте колесных пар за счет восстановления изношенных СМП. Авторы обосновывают концепцию вторичного ресурса: восстановленные СМП используются повторно в сборном инструменте, что снижает расход твердого сплава в 1.5-4 раза. Описаны причины быстрого износа СМП в депо и предложены методы алмазной заточки, термомеханического и ионного упрочнения, повышающие стойкость до 3.5 раз.

Статья актуальна для обоснования применения сборных фрез с СМП, подтверждая эффективность повторного использования пластин и важность адаптации геометрии инструмента к условиям эксплуатации.

Статья М.Ю. Куликова, А.Ю. Попова и Сан Маунга [40] посвящена повышению износостойкости инструмента при колесотокарной обработке без применения СОЖ. Авторы выявили, что износ твердосплавных пластин связан с перегревом и плохим теплоотводом из-за воздушных зазоров между пластиной и державкой. Для устранения этих проблем предложено использовать теплопроводящие эластичные прокладки и кремнийорганические составы. Проведенные лабораторные и производственные испытания показали повышение стойкости инструмента на 15-17%.

Статья полезна для обоснования конструктивных решений сборных фрез с СМП, акцентируя внимание на важности теплоотвода и обеспечении плотного

контакта между пластиной и корпусом инструмента для повышения стойкости при тяжелых режимах обработки.

Статья Д.Г. Евсеева, В.П. Бирюкова, Ю.М. Куликова и А.А. Якубовского [30] рассматривает особенности эксплуатации режущего инструмента при механической обработке деталей мобильных колесных платформ. Авторы подчеркивают, что основным направлением повышения эффективности обработки является внедрение твердосплавных сменных пластин, обеспечивающих универсальность, экономичность и снижение времени переналадки. Также приведены примеры инструментов с различной геометрией и конструкцией, включая пластинчатые токарные резцы и фрезы, рекомендованные для ремонта фасонных деталей.

Статья актуальна в контексте выбора и обоснования конструкции сборных фрез с СМП, подтверждая эффективность сменных пластин в условиях серийного ремонта и акцентируя внимание на необходимости оптимального выбора их формы и крепления.

Статья авторов К.В. Аверкова, Т.Г. Буньковой, М.И. Бисерикана и С.В. Петроченко [1] посвящена оптимизации ремонта колесных пар, включая механическую обработку поверхности катания с повышенной твердостью. Исследование выявляет недостатки текущих методов, такие как повышенные силы резания и быстрый износ инструментов. Для решения предложена новая конструкция резца с тремя твердосплавными пластинами, что обеспечивает разделение припуска и эффективное распределение тепла, снижая напряжения на режущих кромках и увеличивая стойкость инструмента.

Сборные фрезы с СМП превосходят предложенный резец с тремя СМП по производительности, лучше справляясь с высокими нагрузками и обеспечивая быструю обработку сложных деталей. Хотя новая конструкция резца улучшает показатели традиционных инструментов, она уступает сборным фрезам с СМП.

Статья авторов И.А. Иванова, Д.А. Потахова и С.В. Урушева [32, 33] посвящена исследованию напряженного состояния твердосплавного резца с СМП при обточке колесных пар, с учетом силовых и температурных воздействий, а

также геометрии инструмента. С использованием численного моделирования в COSMOSWorks выявлены зоны концентрации напряжений, что способствует повышению надежности инструмента в сложных условиях.

В отличие от сборных фрез с СМП, при износе части призматической пластины требуется полная замена элемента, что увеличивает затраты. Сборные фрезы с СМП позволяют заменить изношенные пластины индивидуально, снижая расходы и повышая производительность в условиях переменных нагрузок.

Статья авторов Filipowicz K., Biedunkiewicz W., Królikowski M. и Grzesiak D. [96] посвящена исследованию технологических проблем обработки упругих колесных пар на токарных станках с фрикционным приводом. Рассматривается моделирование методом конечных элементов для анализа деформаций под воздействием сил, измеренных в процессе обработки. Целью является разработка технологии восстановления профилей бандажей без демонтажа колес. Однако могут возникнуть значительные осевые перемещения, которые могут повлиять на точность профиля и состояние упругих вставок. В отличие от этого, сборные фрезы с СМП обеспечивают равномерное снятие материала, минимизируют осевые перемещения и снижают риск повреждений.

Статья авторов Ghionea, I. G., Ghionea, A. L. и Predincea, N. [98] посвящена исследованию параметров резания и их влияния на репрофилирование колесных пар с использованием методов численного и 3D-моделирования для оптимизации процесса резания. Основной акцент сделан на выборе оптимальных конструкций инструментов и параметров для обработки на модернизированных токарных станках, чтобы повысить эффективность и точность процесса. Однако моделирование и расчеты основываются на ряде допущений, что может снижать точность реальных результатов при вариациях условий эксплуатации. Работа сосредоточена на токарных операциях, не учитывая потенциал сборных фрез с СМП для уменьшения вибраций и улучшения стабильности.

Статья авторов Ghionea, A. L. и Ghionea, I. G. [97] посвящена исследованию по определению параметров и сил резания при обработке поверхностей катания колесных пар, включая теоретические и прикладные аспекты. Описываются

параметры профиля и требования к точности обработки. Для этого использовался токарный станок с ЧПУ, оснащенный двумя рабочими узлами. Исследованы основные параметры резания, силы резания и моменты для оптимизации процесса, а также рассмотрены требования к качеству и точности обработки, минимизации затрат и улучшению динамического поведения станка. Однако авторы сделали акцент на обработке колесных пар с использованием токарного станка, что ограничивает применимость методов к широкому спектру задач, связанных с фрезерованием сложных профилей.

В статьях авторов Sladkowski A., Proydak Yu. и Ruban V. [101, 102, 103, 104] рассматривается улучшение конструкции фрез для обработки колесных пар с целью увеличения их ресурса. Основное внимание уделяется исследованию напряженно-деформированного состояния фрез с помощью метода конечных элементов, что позволило выявить преимущества новой конструкции с увеличенным числом ножей. Это решение снижает нагрузку на каждую пластину, увеличивая их долговечность и снижая вероятность поломки. Проведено моделирование геометрии и условий резания, что способствует более точному анализу работы фрез и снижению нагрузок при обработке колес.

Статья авторов Шаповалов В.Ф., Пермяков А.А. и Клочко А.А. [100] посвящена разработке метода моделирования «дуплексной» фрезы для обработки профиля колесных пар. Основное внимание уделено повышению производительности за счет уменьшения угла скольжения, снижению вибраций, увеличению износостойкости и точности обработки. Разработаны математические модели, позволяющие повысить эффективность обработки и снизить эксплуатационные затраты. Однако авторы не учли сложность конструкции «дуплексной» фрезы, что усложняет ее производство и обслуживание, а также зависимость эффективности от точности настройки параметров.

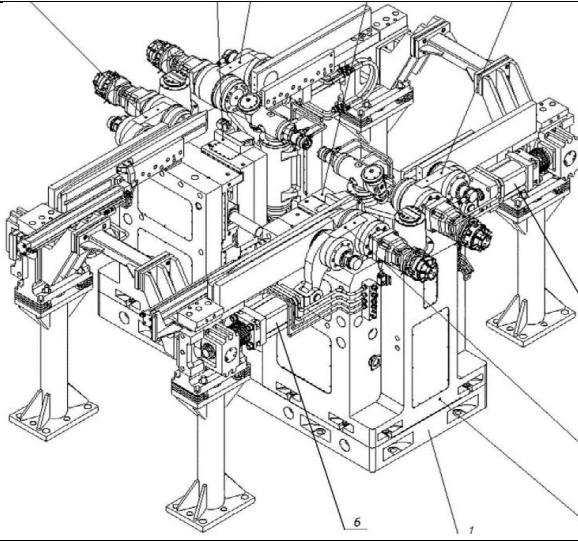
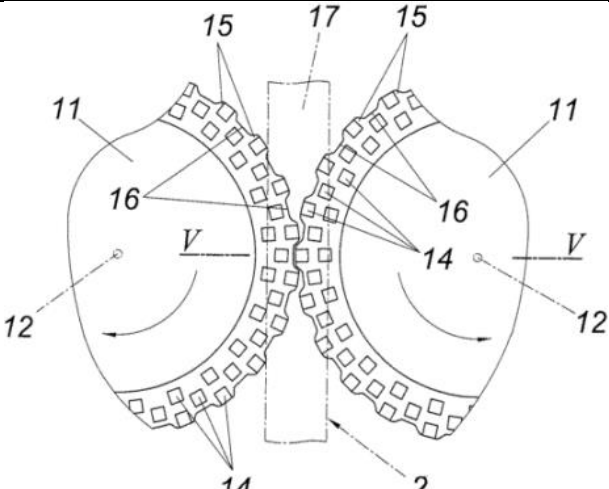
Статья авторов Corral E., Meneses J., Gómez García M.J., Castejón C. и García-Prada J.C. [95] посвящена разработке оптимизированного профиля опорных роликов для подрельсовых токарных станков, использующих один режущий инструмент для репрофилирования колес. Предложен вогнуто-выпуклый

профиль, обеспечивающий плавное перераспределение нагрузки и снижение повреждений. Моделирование и эксперимент подтвердили улучшение процесса.

В табл. 1.11 представлен проведенный патентный поиск по обработке фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении. Поиск охватывал актуальные патентные заявки, поданные в период с 2010 по 2024 годы, что позволило получить данные о самых свежих разработках и технологиях в этой области. Такой подход обеспечил анализ новейших технических решений и тенденций в проектировании и производстве режущих инструментов. Результаты поиска станут основой для дальнейшего исследования и разработки инновационных инструментов для обработки фасонных деталей.

Таблица 1.11

Обзор патентов для обработки фасонных деталей.

1. Станок для обточки колесных пар без выкатки из-под подвижного состава	
<p>Патент на полезную модель № 209261 от 24.08.2021 г. [57] Дата регистрации: 10.02.2022 г. МПК: В23В 5/32 Патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Техстрой центр» (RU)</p>	 <p>A detailed technical drawing of a complex industrial machine. It features a central horizontal shaft with multiple grinding wheels mounted on it. The machine is supported by a sturdy metal frame with four legs. Various adjustment mechanisms, including gears and levers, are visible, allowing for precise control of the grinding process. The drawing is a perspective view showing the machine's structure and components.</p>
2. Устройство для чистовой обработки резанием поверхности катания головки рельса	
<p>Патент на изобретение № 2555298 от 21.01.2011 г. [66] Дата регистрации: 10.07.2015 г. МПК: В23С 3/00; E01В 31/13 Патентообладатель: ШВЕРБАУ ГМБХ УНД КО.КГ (DE), МАШИНЕНФАБРИК ЛИЦЕН УНД ГИССЕРАЙ ГЕЗ.М.Б.Х. (AT)</p>	 <p>A technical drawing showing a cross-section of a rail head being processed. The drawing is divided into two parts by a vertical dashed line. On the left, a curved cutting tool (11) is shown in contact with the rail head (12). The tool has a cutting edge (16) and a support structure (14). On the right, the rail head (11) is shown with a different profile, indicating the result of the cutting process. The drawing includes various numbered labels (11, 12, 14, 15, 16, 17) and arrows indicating the direction of movement and the cutting action.</p>

3. Передвижное устройство для фрезерования головок рельсов

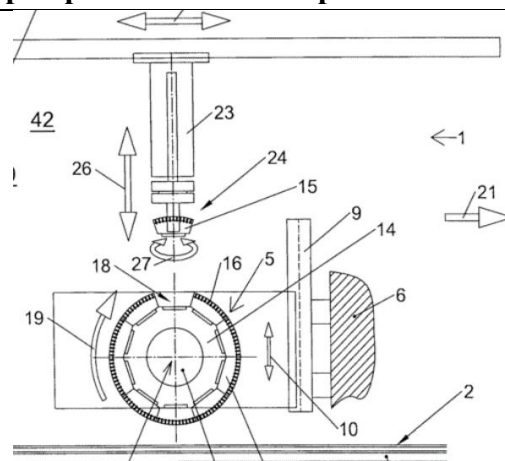
Патент на изобретение № 2607506 от 18.05.2015 г. [67]

Дата регистрации: 10.01.2017 г.

МПК: В23С 1/20; В23Q 3/155; E01В 31/13

Патентообладатель:

ШВЕРБАУ ГМБХ УНД КО. КГ (DE)



4. Устройство для обработки профиля бандажа колесных пар без выкатки

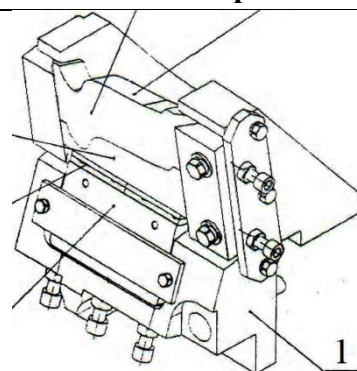
Патент на изобретение № 2717756 от 25.12.2019 г. [68]

Дата регистрации: 25.03.2020 г.

МПК: В23В 5/32

Патентообладатель:

Жуков. С.Н., Королев В.А. (RU)



5. Устройство и способ одновременной механической обработки нескольких колесных пар рельсового транспортного средства

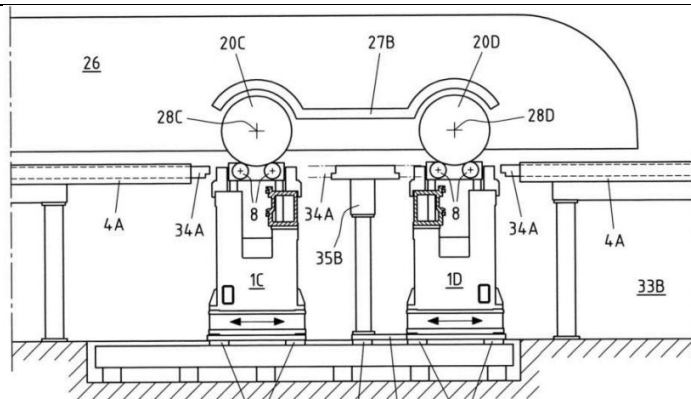
Патент на изобретение № 2734551 от 10.07.2018 г. [69]

Дата регистрации: 20.10.2020 г.

МПК: В23В 5/32

Патентообладатель:

ХЕГЕНШАЙДТ-МФД ГМБХ (DE)



6. Система для восстановления профиля колесной пары железнодорожного транспортного средства

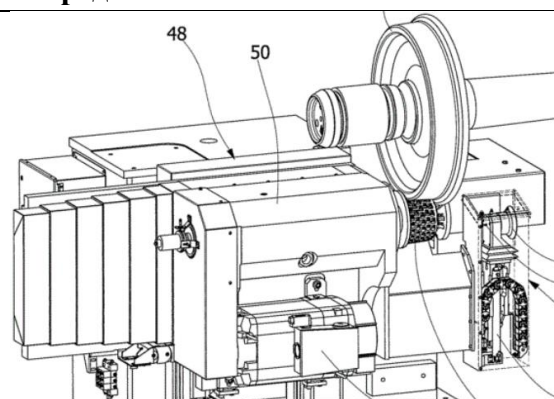
Патент на изобретение № 2773258 от 10.01.2019 г. [72]

Дата регистрации: 01.06.2022 г.

МПК: В23В 5/28

Патентообладатель:

ЭнЭсЭйч ЮЭсЭй КОРПОРЕЙШН (US)



7. Комбинированный режущий инструмент для фрезерования рельсов на месте установки	
<p>Патент на изобретение № 2811301 от 20.07.2021 г. [75] Дата регистрации: 11.01.2024 г. МПК: В23С 5/08; Е01В 31/13 Патентообладатель: Кркк Хай-Тек Эквипмент Корпорейшн Лимитед (CN), Беиджинг Симинвэй Технолоджи Ко., Лтд. (CN), Хэбэй Чжэнцзянь Технолоджи Ко., Лтд. (CN)</p>	
8. Приспособление для обточки железнодорожных колес без снятия их с транспортных средств	
<p>Патент на изобретение № 2820911 от 07.07.2022 г. [76] Дата регистрации: 11.06.2024 г. МПК: В23В 5/32 Патентообладатель: Открытое акционерное общество "Российские железные дороги" (RU)</p>	
9. Силовая малогабаритная головка для фрикционного фрезоточения колес рельсового транспорта	
<p>Патент на полезную модель № 226382 от 01.03.2024 г. [60] Дата регистрации: 31.05.2024 г. МПК: В23С 3/02 Патентообладатель: ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) (RU)</p>	
10. Фреза	
<p>Международный патент на изобретение EP 2896745 A1 от 15.01.2014 г. [99] Дата регистрации: 22.07.2015 г. МПК: Е01В 31/13; В23С 5/22; В23С 3/00; В23С 5/08 Патентообладатель: Suchý, Michal 78964 Bohdikov (CZ)</p>	

11. Способ восстановления профиля по меньшей мере одного рельса	
<p>Патент на изобретение № 2792556 от 04.12.2020 г. [73] Дата регистрации: 22.03.2023 г. МПК: В24В 39/02 Патентообладатель: МАТЕ ГМБХ (АТ)</p>	
12. Способ обработки поверхности головки рельса и устройство для его осуществления	
<p>Патент на изобретение № 2759298 от 12.02.2021 г. [71] Дата регистрации: 11.11.2021 г. МПК: E01В 31/17 Патентообладатель: ФГБОУ ВО «СГУПС» (RU)</p>	

Проведенный анализ диссертаций, научных публикаций и патентов позволил выявить основные подходы к проектированию, восстановлению и обработке рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении, а также к разработке сборных фрез с СМП. Несмотря на достигнутые результаты, сохраняется ряд нерешенных задач, требующих дальнейших исследований и совершенствования конструкций режущего инструмента и технологий обработки.

1.6. Системный подход к выбору метода восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей

1.6.1. Введение в системный анализ в машиностроении

Системный анализ – это методология исследования сложных объектов и процессов, основанная на выявлении взаимосвязей между их элементами,

оптимизации структуры и принятии решений на основе комплексного подхода [22, 38]. Системный анализ применяется в различных областях науки и техники, включая машиностроение, где позволяет рассматривать технологические процессы, оборудование, приспособление, инструмент и деталь (заготовку) как взаимосвязанные элементы единой системы.

Основными задачами системного анализа являются:

1. Выявление структуры системы для определения ключевых элементов и их взаимосвязей;
2. Формальное описание системы путем создания математической, логической или графической модели для последующего анализа и оптимизации;
3. Определение критериев эффективности для установления параметров, по которым оценивается качество системы;
4. Разработка технических решений, направленных на повышение эффективности системы в целом или отдельных ее элементов.
5. Оптимизация решений для нахождения наилучших вариантов проектирования, управления или модернизации.

В машиностроении системный анализ позволяет учитывать большое количество параметров при проектировании, оценивать их влияние на конечный результат и находить компромиссные решения между различными требованиями (точность, производительность, себестоимость, ресурс инструмента и т. д.).

В области обработки изделий системный анализ используется для выбора и оптимизации методов резания, пластической деформации, термической обработки и других процессов. Он помогает:

- определять наиболее подходящие методы обработки в зависимости от материала и конструкции заготовки;
- анализировать влияние параметров обработки на точность, шероховатость, износ инструмента и другие показатели качества системы и ее элементов;
- разрабатывать стратегии комбинированной обработки, включающей сочетание различных методов (например, совмещение фрезерования и пластической деформации для упрочнения поверхностного слоя).

Применение системного подхода при разработке методов обработки позволяет интегрировать физические процессы (резание, пластическое деформирование, термическое воздействие) в единую модель, обеспечивая повышение производительности и качества обработки [22].

Кроме методов обработки, системный анализ применяется при проектировании и модернизации оборудования и инструмента. Его использование позволяет:

- повысить долговечность и износостойкость инструмента за счет оптимального выбора материалов, геометрии режущих кромок и параметров конструкции инструмента в целом;
- разработать адаптивные стратегии обработки, учитывающие изменение условий резания и динамические нагрузки;
- оптимизировать компоновку технологического оборудования, снижая энергозатраты и повышая стабильность обработки.

Системный анализ в машиностроении и обработке материалов является мощным инструментом для повышения эффективности проектирования, разработки и эксплуатации технологических процессов, инструментов и оборудования.

Как показано в работе Кузнецова В.А. [38] применение системного подхода позволяет формализовать задачи проектирования инструмента и моделирования технологических процессов в едином методологическом поле. Проектирование сборной фрезы с СМП и разработка способа обработки рассматриваются как части единой иерархической структуры, включающей цели, критерии, ограничения, параметры элементов системы и их взаимодействия. Такой подход позволяет не только обеспечить полноту охвата проектируемых параметров, но и разработать целостную методологию, включающую построение структурных, функциональных и параметрических моделей, ориентированных на достижение заданных технологических показателей.

1.6.2. Системный анализ методов восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ

1. Методы механической обработки для восстановления фасонных поверхностей

Механическая обработка является основным способом формирования и улучшения характеристик деталей в машиностроении. Этот процесс включает в себя различные методы, которые можно разделить на несколько групп:

- Резание – обработка лезвийными инструментами (точение, фрезерование, сверление, протягивание и др.).

- Абразивная обработка – использование абразивных инструментов (шлифование, хонингование, суперфиниш, полирование и т. д.).

- Пластическое деформирование – изменение формы и структуры материала без снятия стружки (накатывание, раскатка, штамповка и т. д.).

- Специальные методы обработки – электрохимическая, электрофизическая, лазерная, ультразвуковая обработка и другие высокотехнологичные процессы.

Каждый из этих методов имеет свои особенности, область применения и критерии эффективности, к которым чаще всего относят точность, шероховатость поверхности, ресурс инструмента, производительность и энергоэффективность процесса.

2. Задачи системного анализа в механической обработке

Системный анализ используется для исследования и оптимизации сложных производственных процессов. Основные задачи системного анализа в области механической обработки включают [22, 38]:

1. Выявление структуры системы – определение ключевых элементов обработки и их взаимосвязей.
2. Формирование модели системы – создание математической, логической или графической модели для анализа и оптимизации.
3. Определение критериев эффективности – установление количественных

параметров, по которым оценивается процесс обработки.

4. Разработка и оптимизация решений – нахождение наилучших вариантов проектирования, управления или модернизации технологических процессов.

Применение системного анализа позволяет повысить точность прогнозирования результатов обработки, сократить производственные затраты, повысить производительность и улучшить качество выпускаемых изделий.

3. Системный анализ методов обработки изделий

В системном анализе механической обработки рассматриваются следующие ключевые элементы [38]: способы воздействия; формообразование; кинематика процесса; инструмент; динамика процесса; статика процесса.

На рис. 1.7 представлена схема системной модели проектирования и эксплуатации технологических процессов обработки изделий машиностроения.

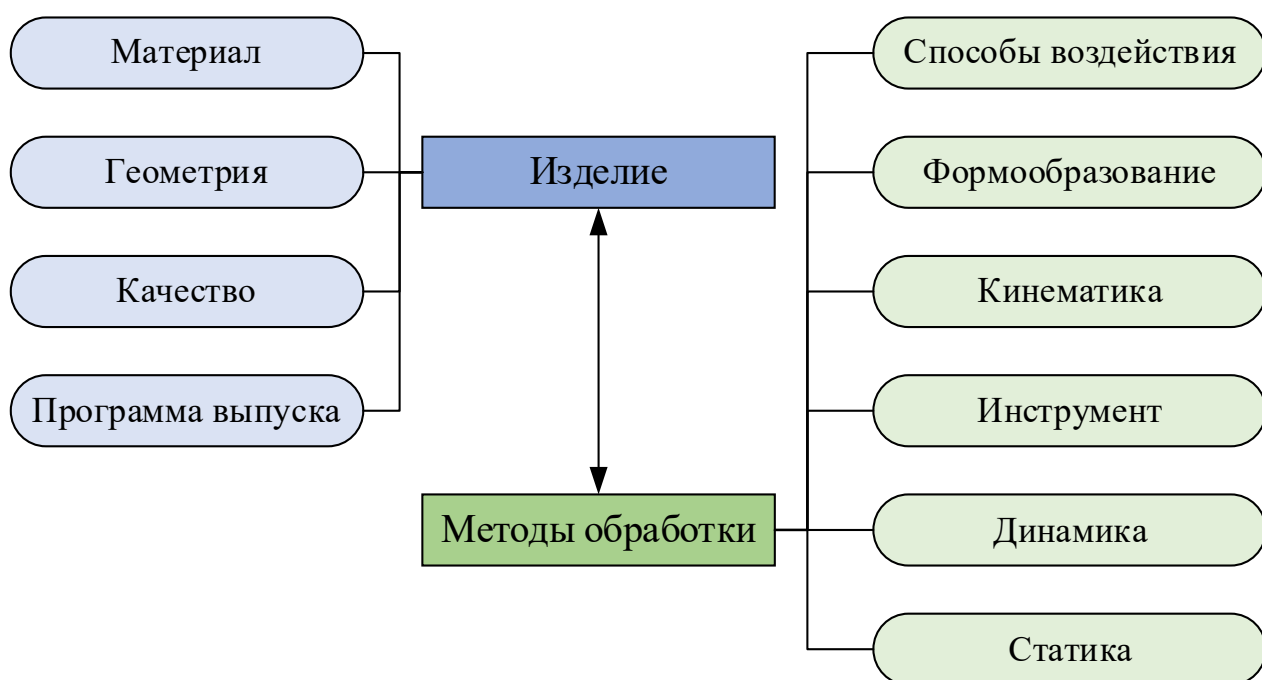


Рис. 1.7 – Системная модель проектирования и эксплуатации методов обработки в машиностроении.

Характеристики блока «Изделие» влияют на выбор метода обработки и параметры фрез:

1. Материал – включает тип материала, физико-механические и другие свойства, включая параметры обрабатываемости разными методами.

2. Геометрия – включает формы и размеры.

3. Качество – включает точность, шероховатость, волнистость, которые определяются эксплуатационными характеристиками.

4. Программа выпуска – включает, объемы и сроки производства.

Составляющие методики обработки влияют на процесс и результат обработки:

- Способы воздействия – определяют, как инструмент воздействует на материал, включая резание, пластическое деформирование и термическое воздействие. На рис. 1.8 представлена схема способов воздействия при обработке фасонных деталей.

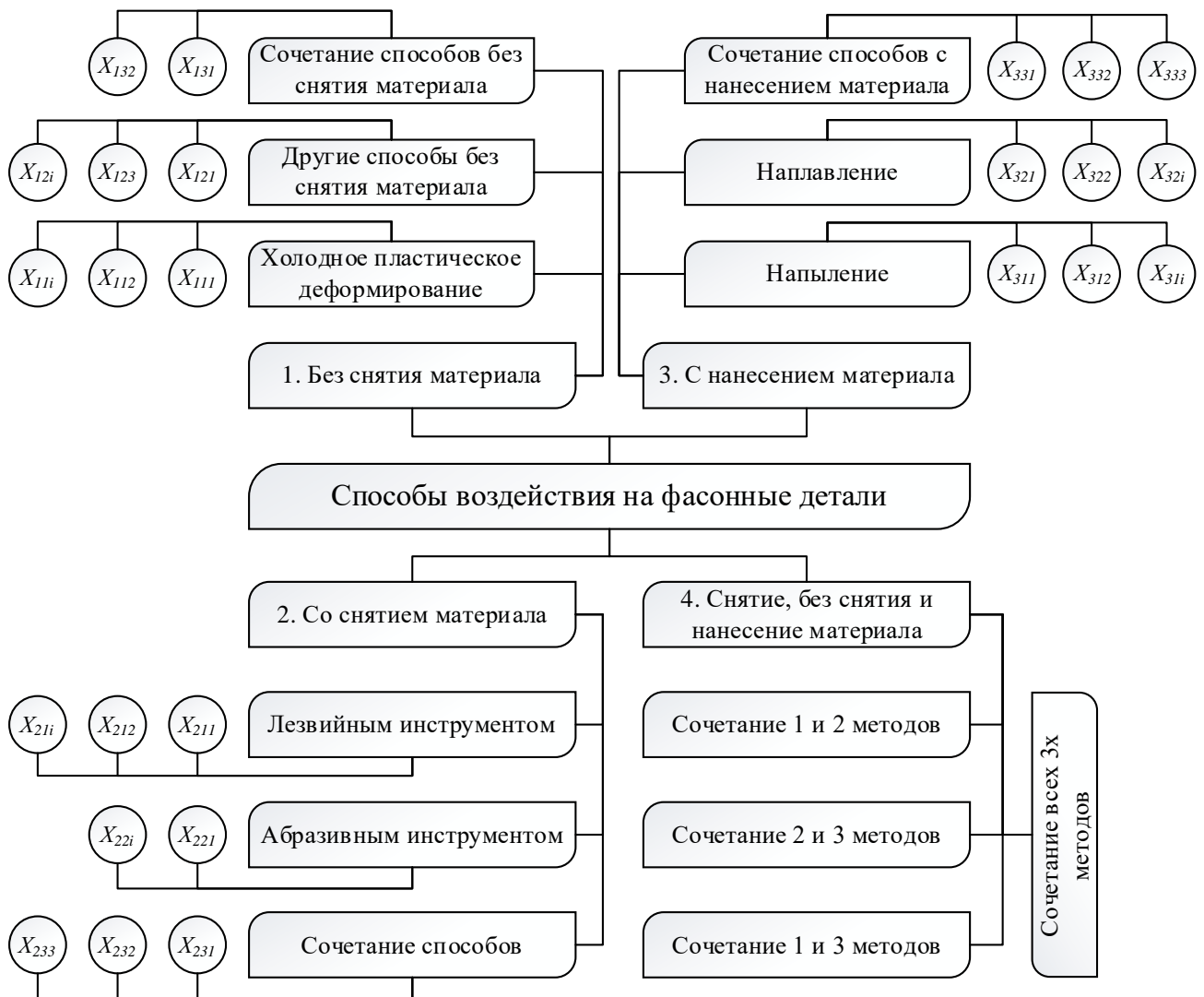


Рис. 1.8 – Способы воздействия при обработке фасонных деталей.

- Формообразование – процесс создания формы детали с использованием методов, таких как копирование, след, касание и обкатка или другие, в

зависимости от используемого способа воздействия и предъявляемых технологических требований.

- Кинематика – описывает взаимодействие инструмента и материала, включая параметры скорости, и траектории движения, что влияет на точность и производительность обработки.

- Инструмент – выбор типа и геометрии инструмента, его материала и конструктивных особенностей, что влияет на эффективность обработки.

- Динамика – определяет силы, возникающие в процессе обработки, включая вибрации и колебания, что влияет на точность и стабильность работы.

- Статика – исследует устойчивость системы, включая стабильность взаимодействия инструмента, материала и оборудования для поддержания точности процесса.

Описание структурных связей способов воздействия при обработке фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении:

1. Методы без снятия материала (пластическая деформация):

1.1. Холодное пластическое деформирование, где X_{111} – накатывание (роликами, обкатывание гребня и др.); X_{112} – деформационное упрочнение (шариками и др.); X_{11i} – другие методы холодной пластической деформации.

1.2. Другие способы без снятия материала, где X_{121} – виброобработка без удаления материала; X_{122} – локальное поверхностное упрочнение (например, лазерное упрочнение без оплавления); X_{12i} – другие (новые) способы без снятия материала.

1.3. Сочетание способов без снятия материала, где X_{131} – комбинация накатывания с локальным упрочнением; X_{13i} – сочетание других (новых) способов обработки без снятия материала.

2. Методы со снятием материала (механическая обработка):

2.1. Резание лезвийным инструментом, где X_{211} – токарная обработка; X_{212} – фрезерная обработка; X_{21i} – другие методы лезвийной обработки, например, рельсофрезерные поезда.

2.2. Резание абразивным инструментом, где X_{221} – шлифование профилей

головки рельсов и катания колесных пар; X_{22i} – другие методы абразивной обработки, например, рельсошлифовальные поезда.

2.3. Сочетание способов со снятием материала, где X_{231} – точение и шлифование, например, колесных пар; X_{232} – фрезерование и шлифование; X_{23i} – другие методы со снятием материала (механической обработки).

3. Методы с нанесением материала (ремонт и упрочнение):

3.1. Напыление, где X_{311} – газотермическое напыление износостойких покрытий, например, на поверхности рельса; X_{312} – плазменное напыление, например, на изношенные участки колесных пар; X_{31i} – другие методы напыления.

3.2. Наплавление, где X_{321} – восстановительная наплавка гребня колесной пары; X_{322} – наплавка рабочей поверхности головки рельса; X_{32i} – другие способы наплавки.

3.3. Сочетание способов с нанесением материала, где X_{331} – наплавка и напыление, например, наплавка слоя металла на рельс, а затем нанесение упрочняющего покрытия для увеличения износостойкости; X_{332} – наплавка и термообработка, например наплавленный металл, подвергается локальной закалке для повышения его твердости; X_{33i} – другие сочетания способов с нанесением материала.

4. Комплексные методы:

4.1. Сочетание способов 1 и 2 групп обработки;

4.2. Сочетание способов 2 и 3 групп обработки;

4.3. Сочетание способов 1 и 3 групп обработки;

4.4. Сочетанием способов 1, 2 и 3 групп обработки.

1.6.3. Взаимосвязи технологических целей с конструктивными параметрами сборной фрезы для обработки фасонных деталей

Представленная на рис. 1.9 структурно-функциональная модель метода фрезерования сборными фрезами с СМП [22, 38] может использоваться для:

1. Выявления взаимосвязей между технологическими целями и конструктивными элементами сборных фрез с СМП для обработки профиля катания колесных пар.

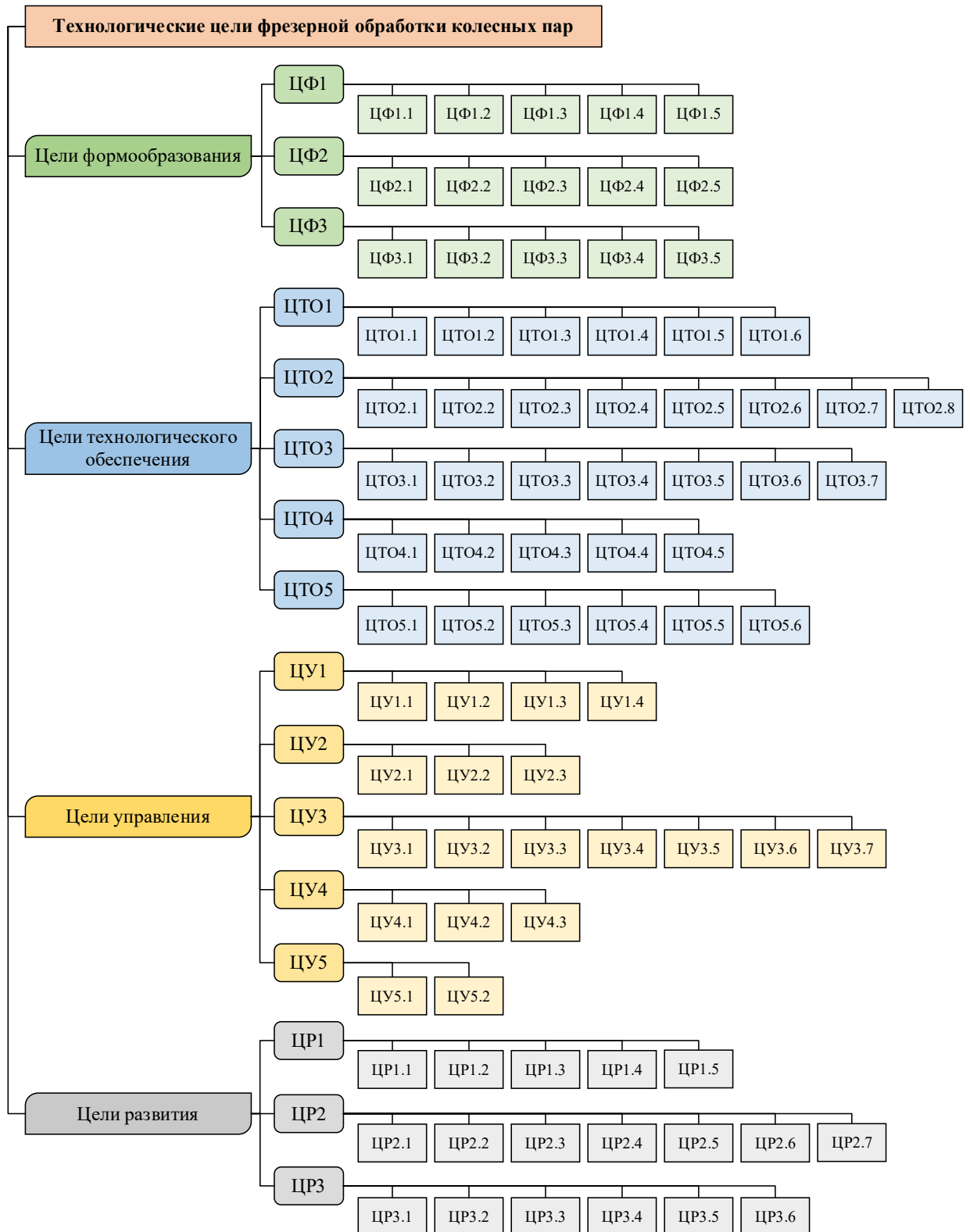


Рис. 1.9 – Структурно-функциональная модель метода фрезерования сборными фрезами с СМП для обработки профиля катания колесных пар.

2. Обоснованного выбора направлений развития конструктивных исполнений, технологии изготовления и повышения эффективности эксплуатации сборных фрез с СМП для обработки профиля катания колесных пар.

Описание параметров схемы:

Цели формообразования (ЦФ):

ЦФ1 – достижение наивысшего качества обработки:

- ЦФ1.1 – обеспечение требуемой точности обработки профиля колесной пары (наилучший квалитет точности IT);
- ЦФ1.2 – обеспечение заданной шероховатости поверхности профиля катания колесной пары (R_a , R_z , R_{max});
- ЦФ1.3 – обеспечение необходимой макро- и микротвердости обработанного поверхностного слоя колесных пар (HV);
- ЦФ1.4 – обеспечение требуемой глубины упроченного поверхностного слоя после обработки ($t_{упр.сл.}$);
- ЦФ1.5 – формирование требуемого уровня остаточных напряжений в поверхностном слое колесной пары ($S_{ост}$).

ЦФ2 – достижение максимальной производительности процесса обработки:

- ЦФ2.1 – обеспечение максимальной скорости главного движения (V);
- ЦФ2.2 – обеспечение максимальной скорости движения подачи (S);
- ЦФ2.3 – обеспечение максимальной глубины резания за один проход (t);
- ЦФ2.4 – обеспечение максимального допустимого усилия резания ($P_{рез}$);
- ЦФ2.5 – совмещение черновой и чистовой обработки или выполнение нескольких поверхностей профиля катания колесной пары в один рабочий проход сборной фрезы.

ЦФ3 – обеспечение минимальных затрат при обработке сборной фрезой:

- ЦФ3.1 – минимизация стоимости используемого технологического оборудования и оснастки ($C_{об}$);
- ЦФ3.2 – минимизация стоимости заготовок ($C_{заг}$);
- ЦФ3.3 – обеспечение минимального расхода сменных режущих пластин или максимальной стойкости режущего инструмента ($T_{ри}$);

- ЦФЗ.4 – минимизация количества основных и вспомогательных рабочих, занятых в технологическом процессе ($Q_{\text{раб}}$);

- ЦФЗ.5 – обеспечение минимальной энергоемкости процесса обработки профиля катания колесных пар (Е).

Цели технологического обеспечения (ЦТО):

ЦТО1 – характеристики способа воздействия сборной фрезы с СМП на обрабатываемую колесную пару:

- ЦТО1.1 – формирование требуемой геометрии профиля катания (Геом) и физико-механических свойств поверхностного слоя колесной пары (ФМС);

- ЦТО1.2 – минимизация энергоемкости процесса фрезерования (Е);

- ЦТО1.3 – обеспечение оптимальных условий поверхности для последующих видов обработки (сл.обр.);

- ЦТО1.4 – максимальный коэффициент использования материала колесной пары ($Мах_{\text{КИМ}}$);

- ЦТО1.5 – обеспечение наилучшей обрабатываемости материала колесной пары при фрезеровании ($K_{\text{обр}}$);

- ЦТО1.6 – удаление дефектного слоя с поверхности катания, минимизация количества поверхностных дефектов ($N_{\text{деф}}$).

ЦТО2 – характеристики сборной фрезы с СМП:

- ЦТО2.1 – расширение технологических возможностей сборной фрезы, возможность обработки различных профилей колесных пар ($T_{\text{возм}}$);

- ЦТО2.2 – обеспечение заданной точности обработки профиля катания колесной пары (наилучший квалитет точности IT);

- ЦТО2.3 – обеспечение эффективного удаления и отвода стружки из зоны обработки (Струж);

- ЦТО2.4 – формирование заданной геометрии (Геом) и требуемых физико-механических характеристик поверхностного слоя колесной пары (ФМС);

- ЦТО2.5 – минимизация усилий резания, действующих на сборную фрезу и технологическую систему в процессе обработки ($P_{\text{ри}}$);

- ЦТО2.6 – обеспечение высокой стойкости и надежности режущих пластин

и сборной фрезы в целом (T_{PI});

- ЦТО2.7 – создание благоприятных условий для последующих стадий технологического процесса обработки колесных пар, например, для шлифования (сл.обр.);

- ЦТО2.8 – обеспечение возможности оперативного восстановления рабочих характеристик сборной фрезы и замены СМП (Восст.РИ).

ЦТО3 – кинематические характеристики процесса обработки профиля колесных пар:

- ЦТО3.1 – сокращение вспомогательного времени за счет быстрого подвода сборной фрезы в зону обработки (Min_h);

- ЦТО3.2 – обеспечение кинематической стабильности процесса фрезерования (Стаб);

- ЦТО3.3 – обеспечение необходимой точности обработки профиля катания колесных пар (наилучший квалитет точности IT);

- ЦТО3.4 – обеспечение заданной шероховатости поверхности катания колесных пар (наилучшая шероховатость Ra);

- ЦТО3.5 – обеспечение максимальной производительности процесса обработки (P);

- ЦТО3.6 – достижение заданных физико-механических характеристик поверхностного слоя колесной пары после обработки (ФМС);

- ЦТО3.7 – обеспечение оптимальных условий для выполнения последующих операций обработки (сл.обр.).

ЦТО4 – динамические характеристики процесса обработки сборной фрезой:

- ЦТО4.1 – обеспечение необходимой жесткости технологической системы «станок-приспособление-инструмент-заготовка»;

- ЦТО4.2 – обеспечение оптимальной виброустойчивости при обработке профиля катания колесных пар (ВУ);

- ЦТО4.3 – обеспечение оптимальной температуры в зоне резания для предотвращения перегрева и преждевременного износа инструмента ($t^{\circ}C$);

- ЦТО4.4 – обеспечение высокой надежности и стабильности работы всей

технологической системы (R_{UTC});

- ЦТО4.5 – обеспечение оптимального уровня мощности и энергоэффективности используемого оборудования (E).

ЦТО5 – статические характеристики процесса обработки поверхности катания колесных пар:

- ЦТО5.1 – обеспечение максимальной точности базирования и установки заготовки (колесной пары) ($e_{баз}$);

- ЦТО5.2 – обеспечение возможности точной регулировки и настройки сборной фрезы на заданные размеры профиля катания колесных пар (Рег. инстр.);

- ЦТО5.3 – минимизация напряжений, возникающих при установке колесной пары в процессе обработки ($S_{баз}$);

- ЦТО5.4 – обеспечение надежности закрепления, как колесной пары, так и сборной фрезы ($R_{закр}$);

- ЦТО5.5 – обеспечение возможности самоустановки и самонастройки сборной фрезы или колесной пары при базировании (Самоуст.);

- ЦТО5.6 – стабильное обеспечение заданного размера профиля катания после обработки (Об-е разм.).

Цели управления (ЦУ):

ЦУ1 – управление характеристиками способа воздействия сборной фрезы на колесную пару:

- ЦУ1.1 – управление траекторией относительного движения сборной фрезы и колесной пары (Траект.);

- ЦУ1.2 – управление направлением относительного движения сборной фрезы и колесной пары (Направл.);

- ЦУ1.3 – управление скоростью относительного движения сборной фрезы и колесной пары (Скор.);

- ЦУ1.4 – управление ускорением относительного движения сборной фрезы и колесной пары (Ускор.).

ЦУ2 – управление характеристиками сборной фрезы с СМП:

- ЦУ2.1 – управление формой и профилем режущей части сборной фрезы

(Форм_{РИ});

- ЦУ2.2 – управление геометрическими параметрами СМП и корпуса фрезы

(Геом_{РИ});

- ЦУ2.3 – управление физико-механическими свойствами СМП (ФМС_{РИ}).

ЦУ3 – управление кинематическими характеристиками процесса фрезерования профиля колесных пар:

- ЦУ3.1 – управление степенью деформации материала колесной пары в зоне резания ($Ст_{\text{Деф}}$);

- ЦУ3.2 – управление характером и направлением деформации обрабатываемого материала колесной пары ($Зн_{\text{Деф}}$);

- ЦУ3.3 – управление видом и характером возникающих напряжений в зоне обработки ($В_{\text{Напр}}$);

- ЦУ3.4 – управление температурой резания и деформации материала в зоне обработки ($t^{\circ}_{\text{деф}}$);

- ЦУ3.5 – управление размерами очага деформации материала колесной пары ($\Gamma_{\text{абОд}}$);

- ЦУ3.6 – управление фазовыми превращениями в материале колесной пары в зоне обработки ($\text{Фаз}_{\text{Пр}}$);

- ЦУ3.7 – управление физико-химическими контактными явлениями на поверхностях взаимодействия инструмента и заготовки (ФХКЯ).

ЦУ4 – управление динамическими характеристиками процесса фрезерования:

- ЦУ4.1 – управление величиной и направлением сил резания, действующих на инструмент и колесную пару (P);

- ЦУ4.2 – управление жесткостью упругой технологической системы (станок-приспособление-инструмент-заготовка);

- ЦУ4.3 – управление вибрационными характеристиками технологической системы в процессе обработки (Вибр).

ЦУ5 – управление статическими характеристиками процесса фрезерования:

- ЦУ5.1 – управление взаимным положением сборной фрезы и колесной пары в процессе обработки ($\text{Пол}_{\text{РИ}}$ и $\text{Пол}_{\text{Зар}}$);

- ЦУ5.2 – обеспечение и поддержание заданных размеров профиля катания колесной пары в процессе обработки (Об-е разм.)

Цели развития (ЦР):

ЦР1 – достижение наивысшего качества обработки колесной пары:

- ЦР1.1 – обеспечение требуемой точности формообразования профиля катания колесных пар (наилучший квалитет точности IT);

- ЦР1.2 – обеспечение необходимой микрогеометрии поверхности катания колесной пары (шероховатость Ra и волнистость S);

- ЦР1.3 – обеспечение заданной макро- и микротвердости обработанного поверхностного слоя колесной пары (HV);

- ЦР1.4 – обеспечение требуемой глубины упрочненного поверхностного слоя после обработки ($t_{\text{упр.сл.}}$);

- ЦР1.5 – формирование требуемого уровня остаточных напряжений в поверхностном слое колесной пары ($S_{\text{ост}}$).

ЦР2 – достижение максимальной производительности процесса обработки профиля катания колесных пар:

- ЦР2.1 – обеспечение максимальной скорости главного движения фрезы (V);

- ЦР2.2 – обеспечение максимальной скорости подачи инструмента относительно обрабатываемой колесной пары (S);

- ЦР2.3 – обеспечение максимально возможной глубины резания за один рабочий проход (t);

- ЦР2.4 – обеспечение максимально допустимого усилия резания без потери точности обработки ($P_{\text{рез}}$);

- ЦР2.5 – совмещение или концентрация основных и вспомогательных технологических операций и проходов обработки колесной пары (Совм+Конц);

- ЦР2.6 – снижение стоимости и сложности элементов технологической системы (станок–инструмент–оснастка) ($C_{\text{эл.ТС}}$);

- ЦР2.7 – уменьшение стоимости и трудоемкости подготовки заготовки (колесной пары) к обработке ($C_{\text{заг}}$).

ЦР3 – обеспечение минимальных приведенных затрат на обработку

профиля катания колесной пары сборной фрезой с СМП:

- ЦРЗ.1 – минимизация стоимости технологического оборудования и оснастки ($C_{эл.ТС}$);
- ЦРЗ.2 – минимизация стоимости подготовки и использования заготовки (колесной пары) ($C_{зар}$);
- ЦРЗ.3 – минимизация расхода сменных режущих пластин или максимизация их стойкости и надежности ($T_{ри}$);
- ЦРЗ.4 – концентрация операций для минимизации количества основных и вспомогательных рабочих, задействованных в технологическом процессе ($Q_{раб}$);
- ЦРЗ.5 – минимизация энергоемкости технологической операции фрезерования профиля катания колесных пар (E);
- ЦРЗ.6 – увеличение коэффициента использования материала колесных пар при механической обработке (КИМ).

Большинство перечисленных технологических целей связаны с конструктивными и/или эксплуатационными параметрами применяемого инструмента (сборной фрезы с СМП) и имеют или могут иметь количественное представление. Поэтому для определения их рациональных значений могут быть применены различные численные методы и подходы, включая задачи математической оптимизации. В частности, задачи управления технологическим процессом, определяемые целями управления (ЦУ1 – ЦУ5), по своей сути являются оптимизационными.

Для оценки возможности применения математических методов для автоматизированного выбора конструктивного исполнения сборной фрезы с СМП для обработки профиля катания колесных были выделены ключевые конструктивные параметры рассматриваемого инструмента. Целесообразно учитывать параметры как фрезы в сборе, так и отдельных сменных режущих пластин. Выделены следующие конструктивные параметры:

Для сборной фрезы с СМП:

- Массогабаритные характеристики (МГХ);
- Способ крепления фрезы на станке (СКр);

- Передний угол в радиальном сечении $\gamma_{\text{рад}}$;
- Передний угол в осевом сечении $\gamma_{\text{ос}}$;
- Задний угол α ;
- Главный угол в плане φ ;
- Число зубьев z .

Для сменных многогранных режущих пластин (СМП):

- Геометрическая форма СМП в плане (ГФ);
- Диаметр вписанной окружности d_{IC} ;
- Толщина пластины S ;
- Задний угол α ;
- Передний угол γ ;
- Класс точности пластины IT;
- Радиус при вершине R_v ;
- Радиус округления режущей кромки r ;
- Инструментальный материал (субстрат) пластины (ИМ);
- Материал износостойкого покрытия (ИП).

Все перечисленные выше параметры СМП могут рассматриваться и задаваться в инструментальной, статической или кинематической системах координат в соответствии с действующими нормативами [13]. При необходимости данный перечень конструктивных параметров может быть дополнен или уточнен для конкретных условий применения.

Функциональные взаимосвязи перечисленных конструктивных параметров сборной фрезы с СМП и технологических целей обработки профиля катания колесных пар представлены в виде матрицы инцидентностей (табл. 1.12). Связи между параметрами могут быть формализованными, неформализованными или отсутствовать. Под формализованными связями подразумевается наличие аналитических зависимостей между соответствующими параметрами и технологическими целями. Неформализованные связи могут быть описаны эмпирическими зависимостями, при которых степень корреляции определяется опытным путем с использованием поправочных коэффициентов и эмпирических

данных для конкретных условий эксплуатации. В соответствии с изложенным, формализованные связи в представленной ниже матрице обозначены знаком «+» [38] и выделяются зеленым цветом. Неформализованные связи обозначены знаком «±» и выделяются желтым цветом. Отсутствие информации о наличии связи обозначено знаком «-» и выделяется красным цветом.

Разработанная матрица взаимосвязей обеспечивает комплексное улучшение показателей процесса, позволяет повысить точность, снизить шероховатость и увеличить стойкость инструмента при сохранении высокой производительности и минимальных затрат. Игнорирование выявленных взаимосвязей может привести к несбалансированным решениям и ухудшению качества обработки. Раскрыты как формализованные связи, так и неформализованные связи. Это разграничение позволяет применять методы математической оптимизации для расчетов там, где зависимости формализованы, и учитывать опытные данные там, где зависимость описана качественно.

Системный подход, реализованный через данную матрицу, способствует реализации рациональных методов проектирования и эффективной эксплуатации сборных фрез с СМП для восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении.

№	Цели	Фреза в сборе							СМП									
		МГХ	СКр	$\gamma_{\text{рад}}$	$\gamma_{\text{ос}}$	α	φ	z	ГФ	$d_{\text{с}}$	S	α	γ	IT	Re	r	ИМ	ИП
62	ЦУ4.1	±	-	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	±	±
63	ЦУ4.2	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	-	-	-
64	ЦУ4.3	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	-	-
65	ЦУ5.1	±	±	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-
66	ЦУ5.2	±	±	-	-	-	+	-	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-
67	ЦР1.1	±	-	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	-	-
68	ЦР1.2	±	-	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	±	±	±	-	-
69	ЦР1.3	±	-	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	-	±	±	±	±
70	ЦР1.4	±	-	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	±	±
71	ЦР1.5	±	-	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	±	±	±
72	ЦР2.1	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	-	±	±
73	ЦР2.2	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	-	±	±
74	ЦР2.3	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	-	±	±
75	ЦР2.4	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	-	±	-	±	±
76	ЦР2.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	ЦР2.6	+	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	±	±	±	+	+
78	ЦР2.7	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	±	±	±	-	±	±
79	ЦР3.1	±	±	-	-	±	-	-	±	±	-	±	±	±	±	-	±	±
80	ЦР3.2	±	-	-	-	±	-	-	±	±	-	±	±	±	±	-	±	±
81	ЦР3.3	±	-	±	±	-	-	±	±	±	-	±	±	±	±	±	±	±
82	ЦР3.4	±	±	-	-	±	-	-	±	±	-	±	±	±	±	-	±	±
83	ЦР3.5	±	±	-	-	±	-	-	±	±	-	±	±	-	±	-	±	±
84	ЦР3.6	±	-	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	-	±	-	-	-

1.7. Общая модель конструкции сборных фасонных фрез

Сборная фасонная фреза с СМП рассматривается как совокупность взаимосвязанных конструктивных элементов. Для формализации этих связей применяется подход, предложенный Гречишниковым В.А. [23] и развитый в работах [7, 43], согласно которому конструкция инструмента представляется ориентированным графом $\Gamma_I = (X, E)$. Вершины X соответствуют элементам конструкции, а ребра E отражают порядок их взаимодействия [7, 23, 43], что обеспечивает компактное описание структуры и последующую алгоритмическую обработку. Вершины и ребра задаются как именованные пары $\{x_1, l_{x1}\}$, $\{x_2, l_{x2}\}$, $\{x_{11}, l_{x11}\}$, ... $\{x_{21222}, l_{x21222}\}$, позволяющие учитывать характер соединений, включая типы креплений и стыковочных поверхностей. В представленной работе модель расширена добавлением ребра, выделяющего рабочую часть в составе корпусной части фрезы. Эта часть может быть реализована в виде сегментов (вершина x_{221} , ребро l_{x221}) либо ножей (вершина x_{222} , ребро l_{x222}), включая их геометрические параметры, а также пазы под режущие и опорные пластины.

На схеме (рис. 1.10) элементы конструкции с ножами выделены красным, с сегментами – зеленым, общие конструктивные элементы – желтым, а элементы, неизменные относительно базовой структуры, – синим, что демонстрирует открытость модели и возможность модификации без изменения ее архитектурной основы.

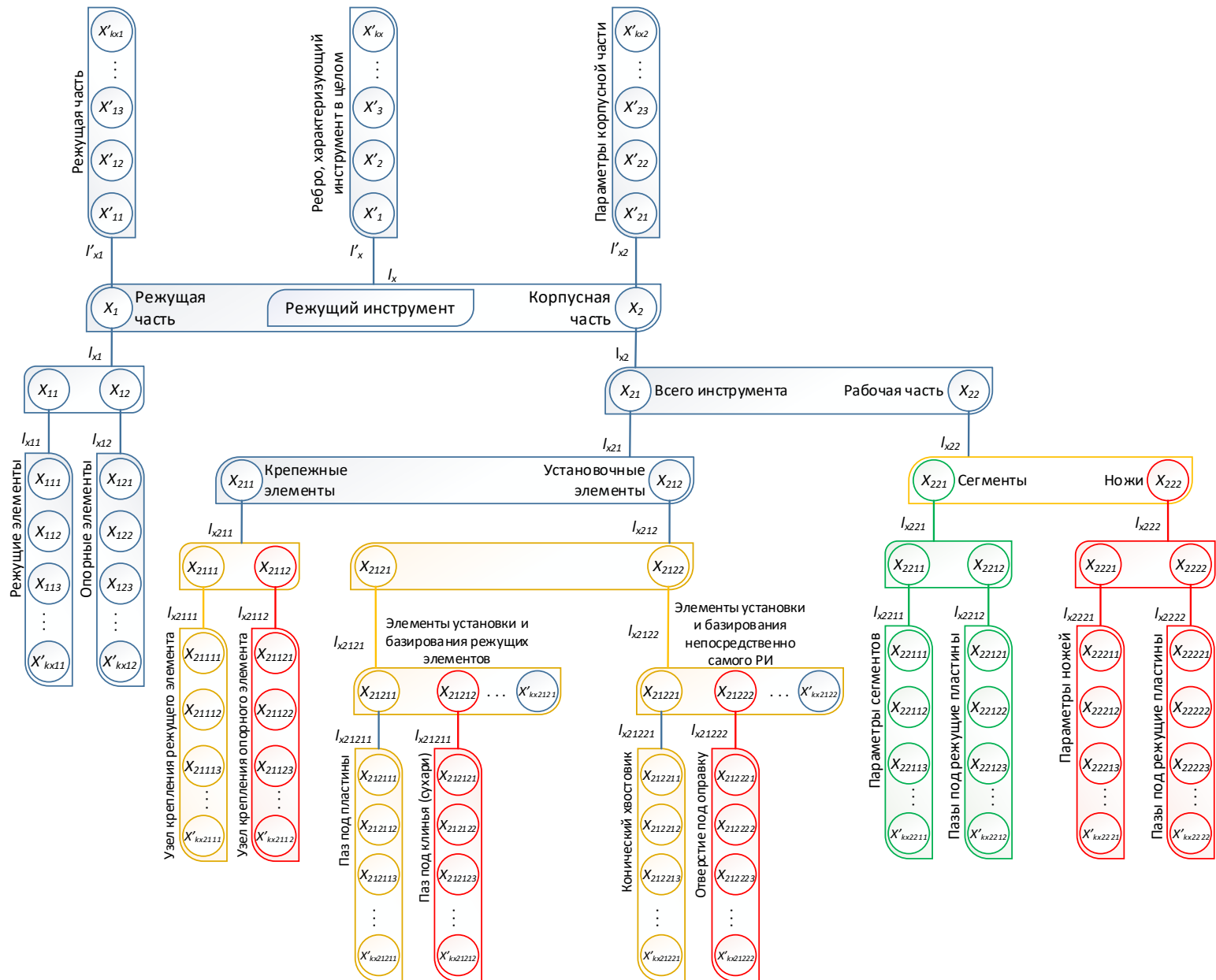


Рис. 1.10 – Граф конструкции сборной фасонной фрезы с СМП.

1.8. Выводы по главе 1

1. Анализ технических требований фасонных деталей мобильных колесных платформ машиностроения подтвердил высокую сложность обработки рабочих поверхностей (включая головки рельсов, острия стрелочных переводов, профили катания колес), обусловленную специфической геометрией фасонных поверхностей, строгими ограничениями по наличию дефектов, а также высокими требованиями к параметрам качества: шероховатость поверхности $Rz = 7\text{--}15$ мкм и твердость в диапазоне от 321 до 402 НВ.

2. Сравнительная характеристика методов восстановления профиля катания колесных пар показала, что при умеренном износе целесообразно применять механическую обработку резанием (точение, фрезерование, шлифование), при глубоком износе – наплавку с последующей обработкой, а для повышения ресурса деталей – комбинирование механической обработки с термическим упрочнением.

3. Критический анализ научных трудов и патентов выявил, что разработанные в них конструкции сборных фрез с СМП недостаточно адаптированы для обработки крупногабаритных деталей сложного профиля, таких как колесные пары и головки рельсов, особенно при переменных нагрузках и высокой твердости обрабатываемого материала (до 402 НВ); кроме того, отмечены высокая трудоемкость настройки и значительная масса применяемых в настоящее время сборных фасонных фрез (до 95 кг), затрудняющие эксплуатацию.

4. Адекватная структурно-функциональная модель фрезерования сборными фрезами с СМП должна отражать следующие взаимосвязи: технологические цели (точность, стойкость, производительность, энергоэффективность) и конструктивные параметры инструмента (форма и геометрия пластин, радиус при вершине R_e , главный угол в плане ϕ , материалы основы и покрытия, число зубьев z и др.), что позволяет обосновывать конструктивные решения.

5. Проведенный патентный анализ за 2010–2024 гг. показал, что

большинство разработок ориентировано на токарную обработку колесных пар, в то время как задачи высокопроизводительной фрезерной обработки фасонных поверхностей, объединяющей черновую и чистовую обработку, остаются недостаточно проработанными; отсутствуют компактные конструкции фрез с повышенной стойкостью, виброустойчивостью и адаптивностью к различным профилям деталей машиностроения.

6. Взаимосвязи между элементами сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами удобно формализовать с использованием графовой модели в виде ориентированного графа, позволяющего наглядно отразить иерархию, соподчиненность и функциональные связи между конструктивными компонентами. Такая модель обеспечивает удобство структурного анализа, способствует логическому обоснованию технических решений и может быть адаптирована под различные конструктивные варианты (с ножами, сегментами или их сочетанием) без изменения базовой структуры.

ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ В ОБЛАСТИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

2.1. Сборные фасонные фрезы для обработки головки рельса

На рис. 2.1 представлена сборная фасонная фреза компании KORLOY (Южная Корея), предназначенная для обработки профилей головки рельсов. Диаметр фрезы составляет $\varnothing 600$ мм, количество режущих зубьев – 198, что обеспечивает равномерную нагрузку и высокую производительность. Тангенциальное расположение пластин повышает стойкость к нагрузкам, а насадной способ крепления и цельный корпус обеспечивают надежность конструкции. Наличие маркировки направления резания исключает ошибки при установке. Применяются два типа пластин с износостойким покрытием и оптимизированной геометрией, что способствует эффективному удалению стружки и точной обработке профиля.

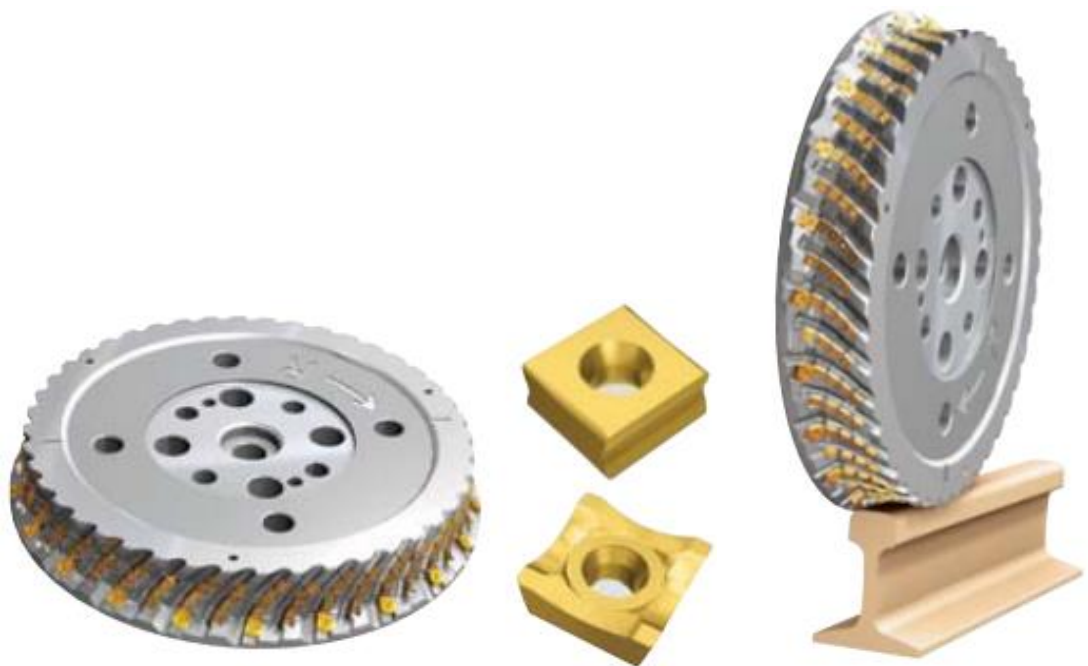


Рис. 2.1 – Сборная фасонная фреза для восстановления направляющей головки рельса фирмы KORLOY, Южная Корея.

На рис. 2.2 изображена сборная фасонная фреза фирмы Iscar (Израиль) с удлиненным вогнутым режущим профилем, который обеспечивает плавную работу и равномерное распределение нагрузки. Пластины в корпусе установлены тангенциально и расположены под углом к оси фрезы для устойчивости к нагрузкам. Способ крепления на станке – насадной, тип корпуса – цельный.

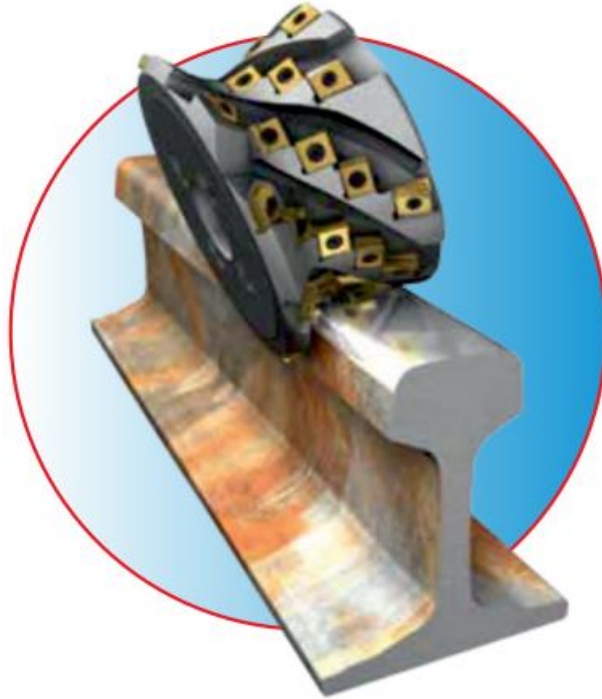


Рис. 2.2 – Сборная фасонная фреза для восстановления направляющей головки рельса фирмы Iscar, Израиль.

2.2. Сборные фасонные фрезы для обработки боковых бочкообразных профилей рельсов

На рис. 2.3 показана сборная фасонная фреза фирмы TaeguTec (Южная Корея), предназначенная для восстановления боковых бочкообразных профилей рельса. Профиль фрезы точно соответствует геометрии боковых поверхностей рельса, обеспечивая высокую точность обработки. В корпусе установлены два типа пластин с тангенциальным креплением и оптимизированной геометрией для эффективного удаления стружки и повышения точности. Способ крепления на станке – насадной, тип корпуса – цельный.

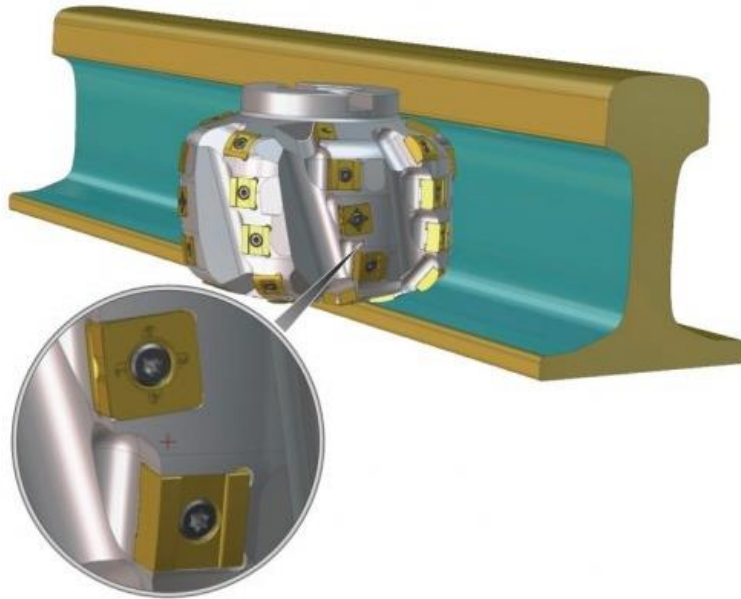


Рис. 2.3 – Сборная фасонная фреза для восстановления боковых бочкообразных профилей рельса фирмы TaeguTec, Южная Корея.

На рис. 2.4 представлена сборная фасонная фреза фирмы CORUN (Сербия), предназначенная для восстановления боковых бочкообразных профилей рельса. Конструктивно данная фреза аналогична фасонной фрезе фирмы TaeguTec (рис. 2.3), но отличается количеством режущих пластин. Увеличенное количество СМП позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности и улучшить качество обработки. СМП в корпусе расположены тангенциально, способ крепления на станке – насадной, тип корпуса – цельный. Диаметр фрезы составляет $\text{Ø}195$ мм, а высота – 165 мм.

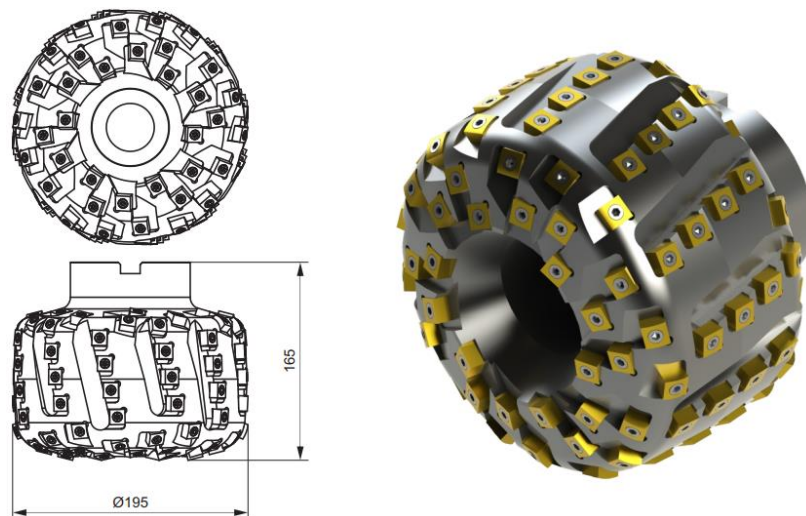


Рис. 2.4 – Сборная фасонная фреза для восстановления боковых бочкообразных профилей рельса фирмы CORUN, Сербия.

2.3. Сборные фасонные фрезы для обработки профиля острия стрелочных переводов

На рис. 2.5 представлена сборная фасонная фреза фирмы TaeguTec (Южная Корея), предназначенная для восстановления профиля острия стрелочных переводов. Фреза формирует полку, наклон и головку острия за один проход, обеспечивая высокую производительность обработки. В корпусе установлены два типа пластин с тангенциальным креплением и оптимизированной геометрией для эффективного удаления стружки и повышения точности. Способ крепления фрезы на станке – насадной. Тип корпуса – цельный.

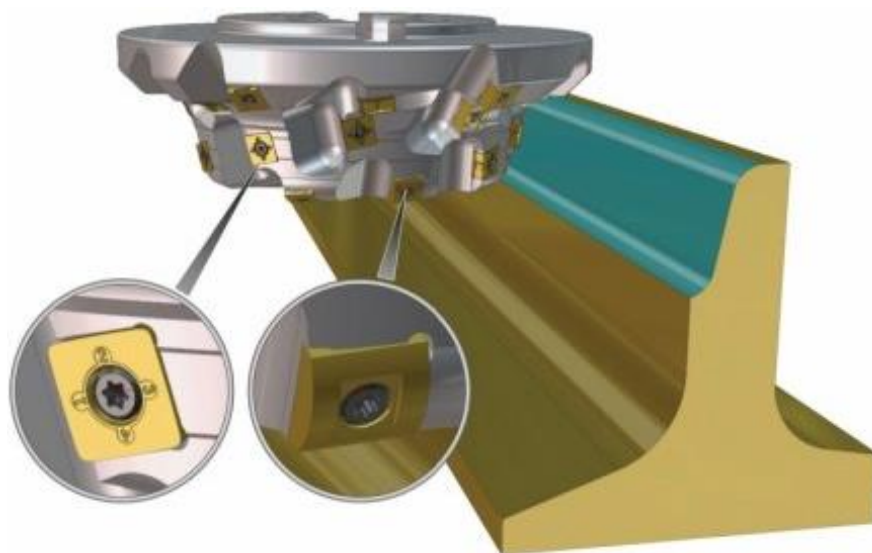


Рис. 2.5 – Сборная фасонная фреза для восстановления головки острия фирмы TaeguTec, Южная Корея.

На рис. 2.6 изображена сборная фасонная фреза фирмы KORLOY (Южная Корея), предназначенная для восстановления головки острия стрелочных переводов. Диаметр фрезы составляет $\varnothing 300$ мм, количество режущих зубьев – 33. СМП в корпусе установлены тангенциально, что обеспечивает устойчивость к нагрузкам и эффективную обработку. Способ крепления фрезы на станке – хвостовой, тип корпуса – цельный.

Применяются четыре типа пластин с оптимизированной геометрией, что обеспечивает высокую точность и производительность.



Рис. 2.6 – Сборная фасонная фреза для восстановления головки остряка стрелочных переводов фирмы KORLOY, Южная Корея.

2.4. Сборные фасонные фрезы для восстановления профиля катания колесных пар

На рис. 2.7 представлена сборная фасонная фреза фирмы CORUN (Сербия), предназначенная для восстановления профиля бандажей колесных пар. Диаметр фрезы составляет $\varnothing 250$ мм. Конструкция фрезы включает 10 ножей, каждый из которых оснащен 11 круглыми пластинами, установленными радиально. Под пластинами размещены компенсационные шайбы различной толщины, обеспечивающие высокую точность позиционирования пластин при наладке инструмента вне станка.

Фреза имеет сборную конструкцию с ножами и двумя кольцами, что повышает ее ремонтпригодность и позволяет быстро заменять изношенные элементы. Способ крепления фрезы на станке – хвостовой. Использование круглых пластин в сочетании с компенсационными шайбами обеспечивает равномерное распределение нагрузки, стабильное качество обработки и возможность настройки фрезы для выполнения сложных профилей.

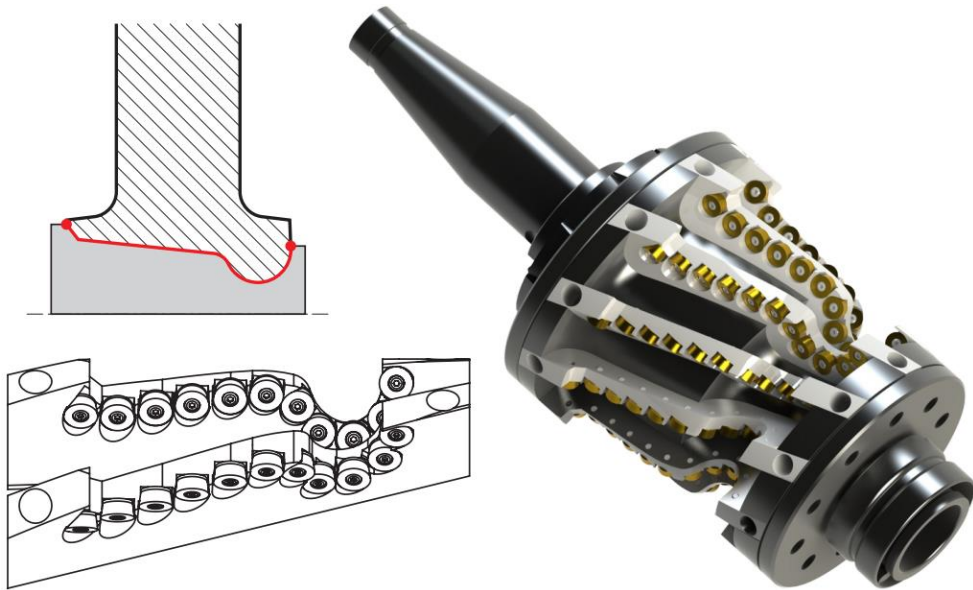


Рис. 2.7 – Сборная фасонная фреза для восстановления профиля бандажей колесных пар фирмы CORUN, Сербия.

На рис. 2.8 представлена сборная фасонная фреза фирмы ЭФСИ (Россия), отличающаяся использованием системы винт-гайка для крепления пластин на ножах. Для фиксации ножей в корпусе применяются сухари, устанавливаемые в специальные пазы и прижимаемые винтами, что предотвращает смещение ножей при обработке сложных профилей. Каждый нож фиксируется 3-4 сухарями, обеспечивая высокую жесткость конструкции. Масса фрез варьируется от 85 до 98 кг при диаметрах 210, 250 и 260 мм.



Рис. 2.8 – Сборная фасонная фреза для восстановления профиля бандажей колесных пар фирмы ЭФСИ, Россия.

В табл. 2.1 представлены сравнительные характеристики всех рассмотренных конструкций сборных фасонных фрез с СМП для обработки фасонных деталей мобильных колесных платформ.

Таблица 2.1

Сравнительные характеристики рассмотренных конструкций сборных фасонных фрез различных производителей.

№	Фирма (страна)	Ориентация пластин в корпусе	Расположение пластин	Форма пластин	Способ крепления пластин	Способ крепления на станок	Корпус фрезы
1	KORLOY, Южная Корея	Тангенциальная	Винтовая	Квадратная (специальная)	Винт	Насадная	Цельная
2	Iscar, Израиль						
3	ТаегуТес, Южная Корея						
4	KORLOY, Южная Корея					Хвостовая	
5	ТаегуТес, Южная Корея					Насадная	
6	CORUN, Сербия						
7	CORUN, Сербия	Радиальная	Наклонная	Круглая	Винт-гайка	Хвостовая	Сборная
8	ЭФСИ, Россия						

2.5. Токарные резцы для восстановления профиля катания колесных пар

Для обработки профилей колесных пар широко используются токарные резцы, которые подходят как для черновой, так и для чистовой обработки. Данные инструменты также позволяют эффективно удалять материал, формировать точный профиль и обеспечивать требуемую шероховатость поверхности.

На рис. 2.9 представлен токарный резец фирмы Dormer Pramet (Чехия), предназначенный для обработки профиля колесных пар. Резец оснащен двумя картриджами: один с тангенциальной прямоугольной пластиной, обрабатывающий около 90% поверхности (от фаски до вершины гребня), второй – с квадратной пластиной, завершающей обработку (рис. 2.10).



Рис. 2.9 – Токарный резец фирмы Dormer Pramet, Чехия.

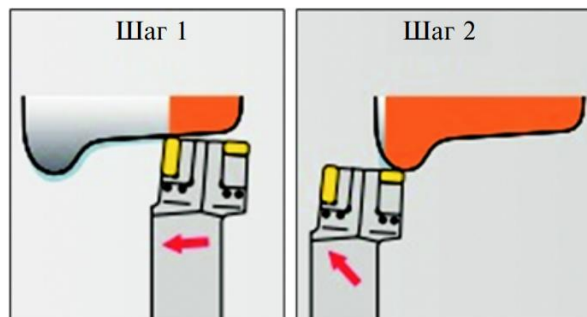


Рис. 2.10 – Способ точения профиля колесной пары.

Пластины установлены на подложки для точного позиционирования и равномерного распределения нагрузок. Картриджи фиксируются в корпусе резца винтами. Несмотря на наличие стружколомов, при обработке фасонного профиля они не всегда обеспечивают эффективное дробление и удаление стружки, что снижает качество обработки.

На рис. 2.11 представлены токарный резец и резцовая головка отечественного производства фирмы ЭФСИ (Россия), конструкция которых аналогична описанной выше конструкции резца фирмы Dormer Pramet. Отличительной особенностью является использование двух одинаковых прямоугольных тангенциальных пластин, что упрощает эксплуатацию.



Рис. 2.11 – Токарный резец и резцовая головка фирмы ЭФСИ, Россия.

Резцовая головка имеет конструкцию, аналогичную резцу, но дополнительно крепится в корпус отдельным соединением. Такое решение повышает универсальность инструмента и дает возможность быстрой замены в случае износа или необходимости смены типа обработки. Данная конструкция обеспечивает высокую точность, простоту наладки и удобство в эксплуатации, сохраняя эффективность при обработке профилей колесных пар.

В табл. 2.2 представлены сравнительные характеристики рассмотренных конструкций резцов с СМП для обработки колесных пар.

Таблица 2.2

Сравнительные характеристики рассмотренных конструкций резцов с СМП.

Фирма (страна)	Dormer Pramet, Чехия	ЭФСИ, Россия
Конструкция	Резец	Резцовая головка
Количество картриджей	2	
Способ крепления картриджей	По два винта каждый	
Форма пластин	Прямоугольная и квадратная	Две прямоугольные
Ориентация СМП в корпусе	Тангенциальная	

2.6. Шлифовальные круги для обработки фасонных деталей

Шлифовальные круги играют одну из ключевых ролей в восстановлении изношенных поверхностей фасонных деталей, особенно на заключительных стадиях обработки, где требуется высокая точность формы и качества

поверхности. Шлифование рекомендуется в тех случаях, когда необходимо устранить глубокие дефекты, полученные в процессе эксплуатации (например, выкрашивания, термические трещины и т.п.), а также при необходимости доводки после черновой механообработки. Особенно эффективно применение шлифовальных кругов для обработки таких деталей, как бандажи колесных пар, гребни колес, рельсы и элементы стрелочных переводов, в том числе острияки.

Для восстановления указанных элементов применяются, в частности, шлифовальные круги с различными характеристиками, адаптированными под конкретные задачи:

- Круги американской компании Norton Abrasives диаметром 750 мм с зернистостью F36 и керамической связкой на основе электрокорунда предназначены для чернового съема значительного объема материала при устранении глубоких дефектов.

- Австрийские круги Tyrolit диаметром 600 мм, выполненные на алмазной основе с металлической связкой и зернистостью F60, оптимальны для шлифования закаленных поверхностей, например, гребней колес, обеспечивая высокую точность и стойкость.

- Круги производства Лужского абразивного завода диаметром 700 мм, на бакелитовой связке с зернистостью F80, отличаются универсальностью применения, устойчивы к переменным нагрузкам и используются при восстановлении как колесных пар, так и рельсов с острияками. Эти характеристики позволяют эффективно применять шлифовальные круги в зависимости от требований к обработке конкретного участка фасонной детали.

Варианты обработки:

- Встречное шлифование – повышает интенсивность съема материала;
- Попутное шлифование – улучшает качество поверхности.

На рис. 2.12 приведены примеры форм шлифовальных кругов для обработки железнодорожных изделий.

В табл. 2.3 представлены характеристики шлифовальных кругов для обработки фасонных деталей.

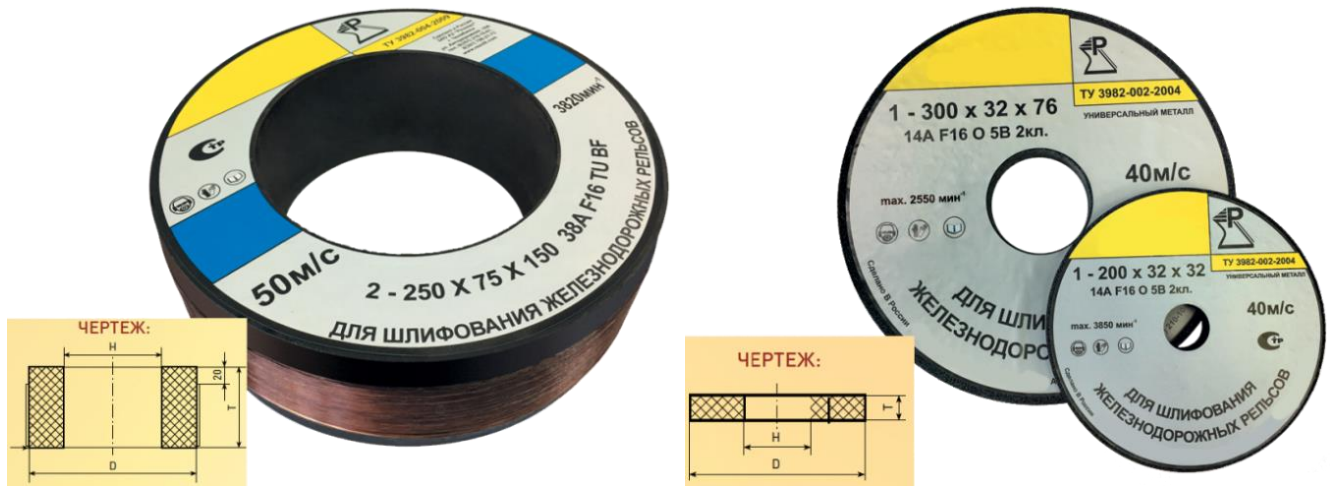


Рис. 2.12 – Примеры форм шлифовальных кругов.

Таблица 2.3

Характеристики шлифовальных кругов.

Параметр	Norton Abrasives (США)	Tyrolit (Австрия)	Лужский АЗ (РФ)
Диаметр, мм	750	600	700
Зернистость, F	36	60	80
Материал абразива	Электрокорунд	Алмаз	Электрокорунд
Тип связки	Керамическая	Металлическая	Бакелитовая
Скорость, м/с	60	65	50
Назначение	Черновая	Черновая/чистовая	Универсальная
Основное применение	Глубокие дефекты бандажей и рельсов	Закаленные поверхности гребня, чистовая обработка	Колесные пары, рельсы и острия стрелочных переводов
Ключевое преимущество	Высокий съем материала	Точность и износостойкость	Устойчивость к переменным нагрузкам

Предложен новый способ восстановления профиля катания колесных пар, при котором используется черновое шлифование для удаления значительного слоя металла (до 12 мм) путем локального нагрева зоны контакта и последующей механической обработки. Шлифовальный круг не только удаляет материал, но и генерирует нагрев до 550-850°C в зоне контакта. Это способствует выравниванию физико-механических свойств металла в приповерхностном слое, формируя структуру перлита и сорбита, что улучшает обрабатываемость на последующих этапах [79].

2.7. Выбор метода обработки: фрезерование как перспективный способ восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей

Токарные резцы с СМП обладают преимуществами в виде простой конструкции, гибкости в настройке, относительно низкой стоимости и удобства эксплуатации, однако их применение ограничено за счет формирования длинной завивающейся стружки, низкой производительности при больших объемах съема материала, быстрого износа инструмента и высоких затрат на СМП.

Шлифование эффективно при устранении глубоких дефектов и придании поверхности требуемых физических свойств, но сопровождается значительным нагревом зоны контакта, высокими энергетическими затратами и сравнительно низкой производительностью.

В то же время сборные фрезы с СМП обеспечивают долговечность за счет конструктивных особенностей, высокую производительность обработки и точность восстановления профиля. Совокупность технических и эксплуатационных преимуществ позволяет рассматривать фрезерование с применением сборных фрез с СМП как наиболее перспективный способ восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении.

Таким образом, на основании анализа конструкций токарных резцов с СМП, шлифовальных кругов и сборных фасонных фрез с СМП, применяемых для восстановления рабочих поверхностей фасонных деталей мобильных колесных платформ в машиностроении, в качестве перспективного метода восстановления выбран способ фрезерования.

2.8. Выводы по главе 2

1. Анализ конструкций сборных фрез с СМП, применяемых для восстановления поверхностей фасонных деталей, выявил преобладание решений

(KORLOY, Iscar, TaeguTec, CORUN) с тангенциальным расположением пластин и цельными корпусами. Диапазон диаметров составляет 195-600 мм при числе зубьев от 33 до 198. Используются специализированные пластины (квадратные, круглые и др.) с оптимизированной геометрией. Большинство фрез имеют насадной способ крепления, за исключением моделей для острияков (KORLOY) и колесных пар (CORUN, ЭФСИ), где применяется хвостовое крепление.

2. Сравнение технических решений показало, что фреза CORUN с радиальным креплением круглых пластин и компенсационными шайбами обеспечивает высокую точность настройки. Конструкция ЭФСИ с системой винт-гайка и с дополнительной фиксацией ножей с помощью сухарей отличается повышенной жесткостью; масса таких фрез достигает 85-98 кг при диаметрах 210-260 мм.

3. Анализ альтернативных методов показал, что токарные резцы (Dormer Pramet, ЭФСИ) удобны в настройке, но формируют длинную стружку и требуют частой замены пластин. Шлифовальные круги (Norton, Tyrolit, Лужский АЗ) применяются при съеме до 12 мм и имеют низкую производительность.

4. Выбор фрезерования как перспективного метода восстановления обусловлен его технологическими преимуществами. В сравнении с точением и шлифованием, сборные фасонные фрезы с СМП обеспечивают высокую стойкость, производительность, точность профиля и возможность обработки в один проход. Повышенная жесткость конструкции, универсальность применения и многозубая конфигурация делают фрезерование эффективным решением для восстановления фасонных деталей мобильных колесных платформ.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СБОРНЫХ ФРЕЗ

3.1. Блок-схема системы автоматизированного проектирования сборной фасонной фрезы с СМП

При проектировании сборных фасонных фрез с СМП исходными данными являются обрабатываемый материал и профиль катания колесных пар [34, 92]. Блок-схема САПР сборной фасонной фрезы с СМП представлена на рис. 3.1 (а, б).

В блоке 2 производится выбор профиля катания (бандажа) колесных пар в зависимости от типа мобильных колесных платформ (для МВПС, локомотивов, электровозов, тележек, кранов и т.п.), шероховатости поверхности, которая должна быть достигнута после обработки, материала катания колесных пар (Ст2, Ст4) и его механических свойств (твердость НВ).

В блоках 3 и 4 выбирается ширина профиля колесных пар (например, 130, 140 мм и др.) и толщина гребня (реборды) в зависимости от профиля колесных пар (23, 29, 30, 33 мм и др.).

В блоках 5 и 6 осуществляется выбор конструкции сборной фасонной фрезы (ножи или сегменты в которых устанавливаются СМП).

В блоках 6.1-6.4 в зависимости от выбранной конструкции сборной фасонной фрезы определяются диаметр фрезы ($D = 230$ мм), количество сегментов ($Z_c = 5$ шт.), угол наклона зубьев ($\omega = 5^\circ$) и количество сменных многогранных пластин ($n = 110$ шт.).

В блоке 7 выбирается диаметр сборной фасонной фрезы с ножами ($D = 260, 250$ или 210 мм). В блоках 7.1-7.3 для выбранного диаметра фасонной фрезы определяются число ножей ($Z = 14$ или 10 шт.), угол наклона ножей ($\omega = 20$ или 15°) и общее количество СМП ($n = 182, 130$ или 123 шт.).

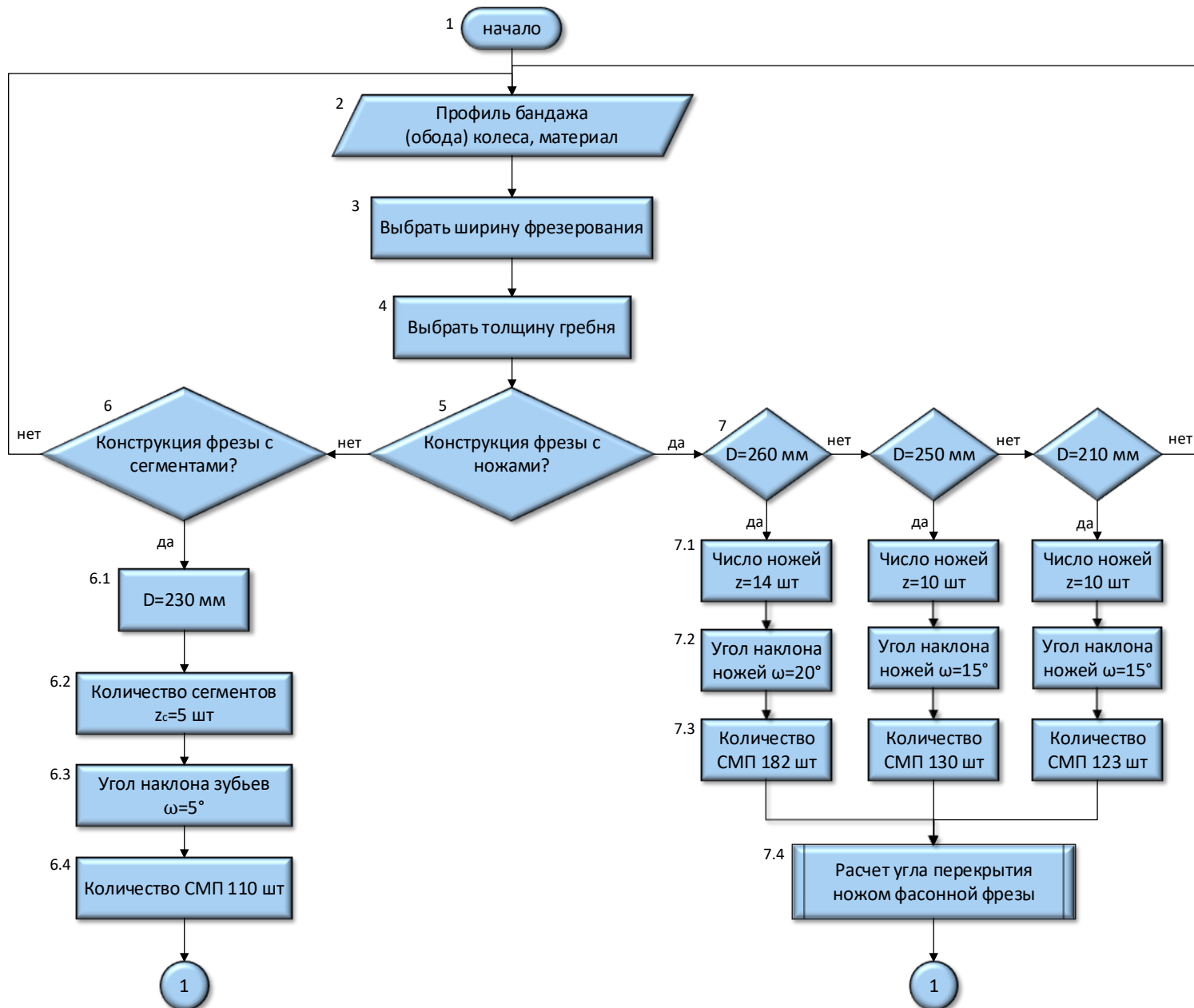


Рис. 3.1 (а) – Блок-схема САПР сборки фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами.

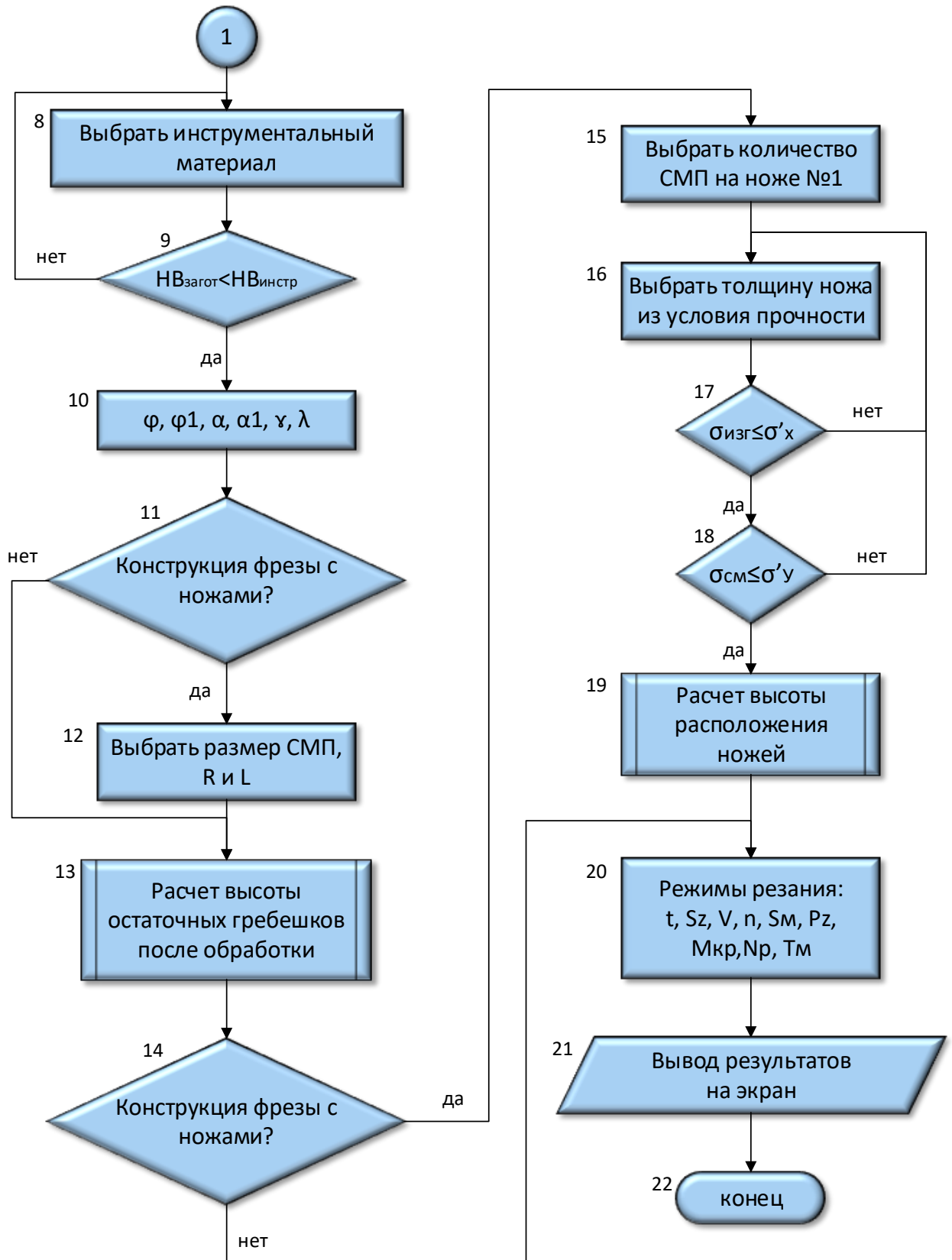


Рис. 3.1 (б) – Блок-схема САПР сборной фасонной фрезы со сменными многогранными пластинами.

В блоке 7.4 производится расчет угла перекрытия ножом фасонной фрезы

для проверки обеспечения условия равномерности фрезерования.

В блоке 8 осуществляется выбор инструментального материала.

В блоке 9 проводится проверка соотношения твердости материала инструмента и заготовки на соответствие условию $HВ_{инстр.} > 1.5 \cdot HВ_{загот.}$

В блоке 10 задаются углы резания.

В блоке 11 осуществляется выбор конструкции сборной фасонной фрезы с ножами или с сегментами.

В блоке 12 выбирается размер круглой СМП ($d = 12, 14$ или 16 мм), если выбрана конструкция сборной фасонной фрезы с ножами (блок 11).

В блоке 13 рассчитывается высота остаточных неровностей, образующихся после обработки колесных пар.

В блоке 14 осуществляется выбор конструкции сборной фасонной фрезы с ножами или с сегментами, в которых устанавливаются СМП.

В блоке 15, если была выбрана конструкция сборной фасонной фрезы с ножами, определяется количество круглых СМП на ноже №1 (13 или 14 шт.).

В блоках 16-19 проверяются конструктивные параметры ножей с учетом условий прочности. Конструкция проходит проверку на изгиб и смятие, а также рассчитывается высота расположения ножа в корпусе фасонной фрезы.

В блоке 20 производится расчет режимов резания.

В блоке 21 осуществляется вывод на экран окончательной конструкции сборной фасонной фрезы и рассчитанных режимов резания.

Разработанная блок-схема САПР сборной фасонной фрезы с СМП обеспечивает систематизированный и последовательный выбор всех ключевых параметров конструкции и режимов обработки. Ее применение повышает качество проектирования инструмента, позволяет оптимизировать конструкцию под конкретные условия эксплуатации и обеспечивает достижение требуемых показателей производительности и качества обработки профиля катания колесных пар. На основе разработанного алгоритма создана программа для ЭВМ, по которой подана заявка на получение свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

3.2. Разработка методики (алгоритма) расчета и проектирования конструктивных элементов сборной фасонной фрезы

3.2.1. Разработка алгоритма расчета геометрических параметров

Оптимальная величина заднего угла зависит, главным образом, от толщины срезаемого слоя α_{\max} и определяется по формуле (3.1) [36]:

$$\sin(\alpha_{\text{opt}}) \approx \frac{c}{\alpha_{\max}^{0.3}}; \quad (3.1)$$

Принимаем $\alpha_{\text{opt}} = 5^\circ$. При фрезеровании сталей фрезами, оснащенными пластинками из твердого сплава, коэффициент $c = 0.13$ [36].

При изготовлении фрезы необходимо знать величину угла α_N , измеренного в плоскости, перпендикулярной к главной режущей кромке:

$$\text{tg}(\alpha_N) = \text{tg}(\alpha) \cdot \cos(\omega); \quad (3.2)$$

где ω – угол наклона ножей фрезы. Для расчетов принимаем $\alpha_N = 8^\circ$.

Величина угла γ_N определяется по формуле (3.3):

$$\text{tg}(\gamma_N) = \text{tg}(\gamma) \cdot \cos(\omega); \quad (3.3)$$

Согласно расчетам, принимаем $\gamma_N = -8^\circ$.

Главный угол в плане φ является важным фактором, влияющим на повышение стойкости инструмента и производительности процесса. Основной функцией этого угла является изменение толщины и ширины срезаемого слоя при постоянной глубине резания и подаче. Кроме того, угол в плане оказывает влияние на соотношение составляющих сил резания. У фасонной фрезы угол φ изменяется вдоль обрабатываемого профиля в диапазоне от 10° до 90° (без учета изменения величины припуска).

Величина угла λ определяем:

$$\text{tg}(\lambda) = \text{tg}(\gamma) \cdot \sin(\varphi) + \text{tg}(\gamma) \cdot \cos(\varphi) \quad (3.4)$$

Принимаем $\omega = \lambda = 15^\circ$.

Определяем радиальный угол $\gamma_{\text{рад}}$ СМП в радиальном сечении:

$$\text{tg}(\gamma_{\text{рад}}) \approx \text{tg}(\gamma_N) \cdot \sin(\varphi) \quad (3.5)$$

Принимаем $\gamma_{\text{рад}} = -7^\circ$.

Полученные значения геометрических параметров служат основой для последующих этапов проектирования конструкции сборной фасонной фрезы с СМП и выбора обоснованных режимов резания, обеспечивающих повышение стойкости инструмента и качества обработки профиля катания колесных пар.

3.2.2. Определение положения режущих пластин в ноже и расположения ножей в корпусе сборной фасонной фрезы

Для обеспечения корректной ориентации режущих пластин в ноже и точного расположения ножей в корпусе сборной фасонной фрезы необходимо, прежде всего, задать требования к качеству поверхностей базовых элементов, определяющих положение СМП. Шероховатость гнезда под СМП в ноже, согласно требованиям ГОСТ 28436-90 [15], должна быть не более $Ra = 2.5$ мкм (5-6 класс шероховатости), что достигается фрезерованием концевой фрезой. Аналогично, поверхность паза под ножи в корпусе фрезы должна иметь шероховатость не более $Ra = 1.6$ мкм (6-7 класс), обеспечиваемую шлифованием или высокоточным фрезерованием.

Установленные требования к чистоте поверхностей обеспечивают надежное базирование положения режущих пластин, после чего становится возможным переход к расчету и определению координат их расположения.

При проектировании сборной фрезы ориентация СМП выполняется путем последовательного перехода от системы координат детали к системе координат корпуса инструмента. Положение каждой i -й режущей пластины ($РП_i$) задается через координаты начальных точек O_{pni} , которые не совпадают с центром оси пластины O_{pnci} . На рис. 3.2 приведены координаты центров O_{pnci} по осям X и Y для ножа №1 при обработке профиля ДМетИ. Значения, уточненные с учетом

всех поворотов, сведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Начальная точка O_{pn} системы координат режущих пластин на ноже №1.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
$X \pm 0.05$, мм	47.5	61.5	75.7	89.7	103.7	117.8	131.9	145.9	160	168.1	181.8	193.4	200.7
$Y \pm 0.05$, мм	61.7	53.6	50.6	49	47.9	46.8	45.6	43.9	39.3	26.9	18.5	24.1	37.8

Следующим этапом является определение положения СМП по оси Z и настройка главной базовой точки K_i , что выполняется вне станка на специальном стенде путем подбора толщины опорных пластин (рис. 3.3). Такая настройка обеспечивает требуемую точность формирования задних и передних углов, а также корректное базирование режущей кромки.

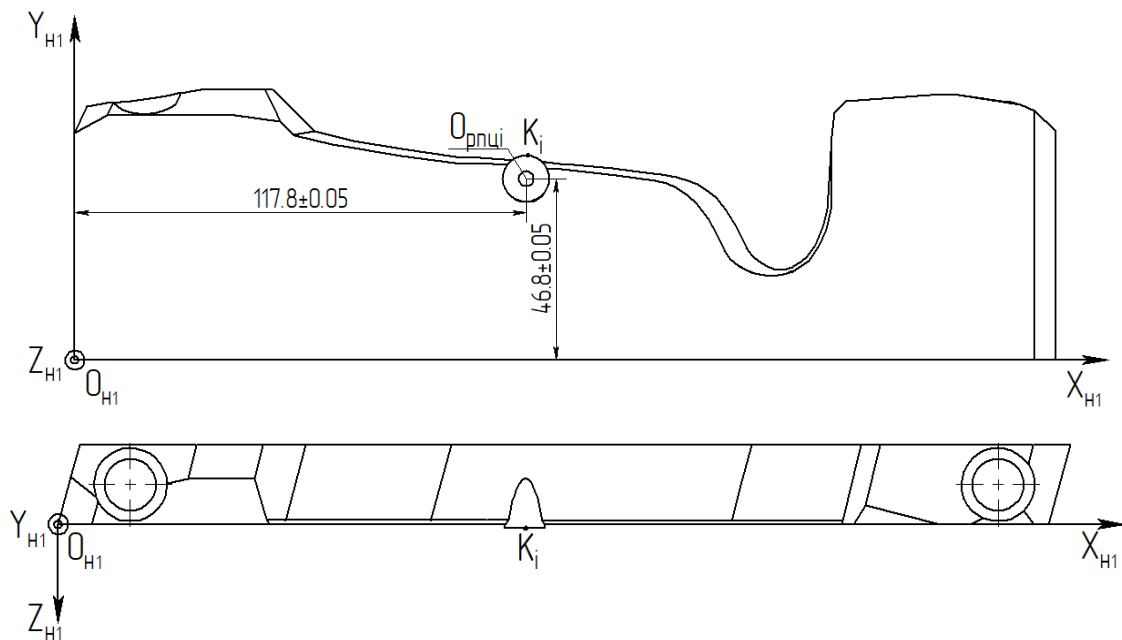


Рис. 3.2 – Координаты центра оси СМП O_{pnci} на ноже № 1 по оси X и Y .

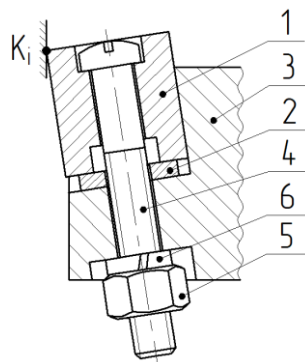


Рис. 3.3 – Способ настройки главной базовой точки K_i режущей пластины: 1 – СМП; 2 – опорная пластина; 3 – нож; 4 – винт; 5 – гайка; 6 – пружинная шайба.

Определение системы координат СМП в ноже производится поворотом СМП вокруг оси $O_{pn}Z_{pn}$ на угол ω_z , равный углу φ . После этого поворота вспомогательная система координат имеет положение $X_{pn1}Y_{pn1}Z_{pn1}$ (рис. 3.4, а). Затем осуществляется поворот СМП вокруг оси $O_{pn1}Y_{pn1}$ на угол ω_y , равный углу наклона зуба λ_{pn} , который равен углу наклона стружечной канавки ω . После поворота вспомогательная система координат имеет положение $X_{pn2}Y_{pn2}Z_{pn2}$ (рис. 3.4, б).

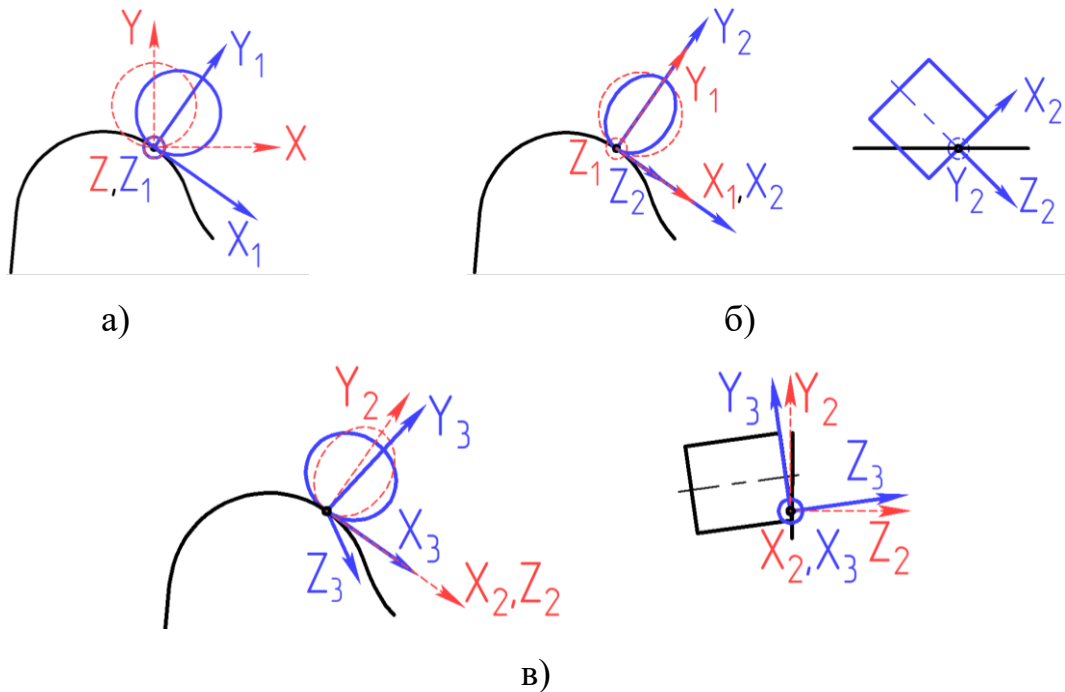


Рис. 3.4 – Схема определения положения СМП в корпусе сборной фасонной фрезы.

В заключение выполняется поворот СМП на угол ω_x относительно оси $O_{pn2}X_{pn2}$ (рис. 3.4, в). Поскольку СМП выполнена в форме цилиндра, угол λ_{pn} полученный в предыдущем повороте, не меняет свое значение. Пластины в форме цилиндра применяются в конструкции сборной фасонной фрезы благодаря более стабильному характеру изменения кинематических задних углов. В отличие от СМП с собственным задним углом, цилиндрические СМП формируют задний угол за счет установки в корпусе инструмента. Это повышает стойкость инструмента и позволяет настраивать его под условия резания. Данный поворот окончательно определяет главный и вспомогательный задние углы (α и α_1 , соответственно) и передний угол γ . А главный и вспомогательный углы в плане φ и φ_1 зависят от глубины снимаемого слоя.

Таким образом, координаты базовых точек СМП после ориентации в системе координат режущей пластины $X_{pn}Y_{pn}Z_{pn}$ определяются по выражению [7, 25]:

$$[A_{pni}] = [P_x] \cdot [P_y] \cdot [P_z] \cdot \{R_i\},$$

где $[P_x]$, $[P_y]$, $[P_z]$ представляют собой матрицы поворотов на углы ω_x , ω_y , ω_z соответственно.

Известна методика преобразования координат геометрических объектов, которая выполняется с помощью матриц четвертого порядка в однородных координатах [7, 92]:

$$[M]_{O_i-O_{i+1}} = [M_x] \cdot [M_y] \cdot [M_z] \cdot [M_u]; \quad (3.7)$$

где $[M_x]$, $[M_y]$, $[M_z]$ – матрицы поворотов вокруг осей X , Y , Z системы координат O_i ; $[M_u]$ – матрица смещения начала координат O_{i+1} относительно O_i .

Матрицы поворотов и смещения имеют вид [2, 7, 37, 88, 90]:

$$[M_x] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Psi_x & -\sin\Psi_x & 0 \\ 0 & \sin\Psi_x & \cos\Psi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.8)$$

$$[M_y] = \begin{bmatrix} \cos\Psi_y & 0 & \sin\Psi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\Psi_y & 0 & \cos\Psi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.9)$$

$$[M_z] = \begin{bmatrix} \cos\Psi_z & -\sin\Psi_z & 0 & 0 \\ \sin\Psi_z & \cos\Psi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (3.10)$$

$$[M_u] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & U_x \\ 0 & 1 & 0 & U_y \\ 0 & 0 & 1 & U_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.11)$$

где Ψ_x , Ψ_y , Ψ_z – углы поворота системы координат O_{i+1} относительно соответствующих осей системы координат O_i ; U_x , U_y , U_z – координаты смещения центра новой системы.

Координаты точек задаются вектором [7]:

$$\{R_i\} = \begin{bmatrix} x_{Ri} \\ y_{Ri} \\ z_{Ri} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.12)$$

где, x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri} – координаты точки R в системе координат O_i .

а преобразованные координаты вычисляются как [7]:

$$\{A_{ui}\} = [M]_{д-и} \cdot \{R_{di}\}. \quad (3.13)$$

После завершения ориентации СМП в системе $X_{pn}Y_{pn}Z_{pn}$ может быть осуществлен переход к системе координат инструмента $X_{pu}Y_{pu}Z_{pu}$ [7]:

$$\{A_{ui}\} = [M]_{рп-и} \cdot \{A_{рпi}\}, \quad (3.14)$$

где $[M]_{рп-и}$ представляет собой матрицу перехода от системы координат СМП к системе координат режущего инструмента (1.6).

На основе проведенных выше расчетов, строим положение ножа в сборе в корпусе сборной фасонной фрезы. Таким образом, координаты базовых точек СМП после ориентации в системе координат и конечное положение ножа с СМП в корпусе фасонной фрезы показано на рис. 3.5. Рабочий чертеж сборной фасонной фрезы с СМП представлен на рис. 3.6.

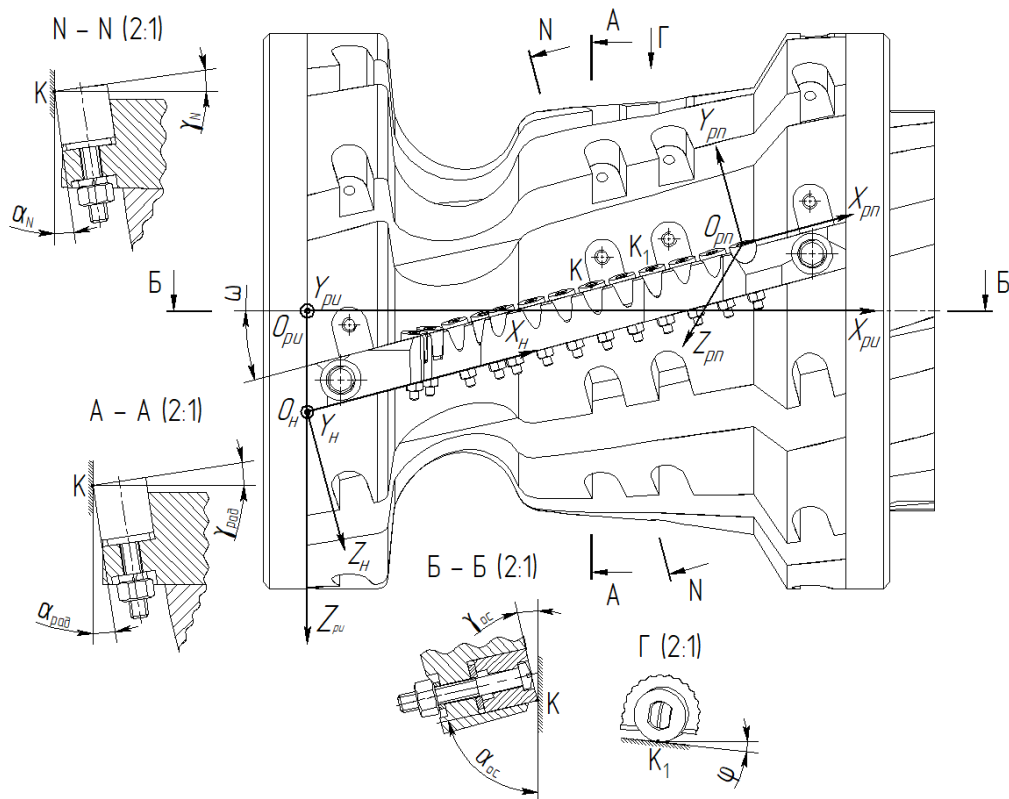


Рис. 3.5 – Система координат инструмента, ножа и СМП.

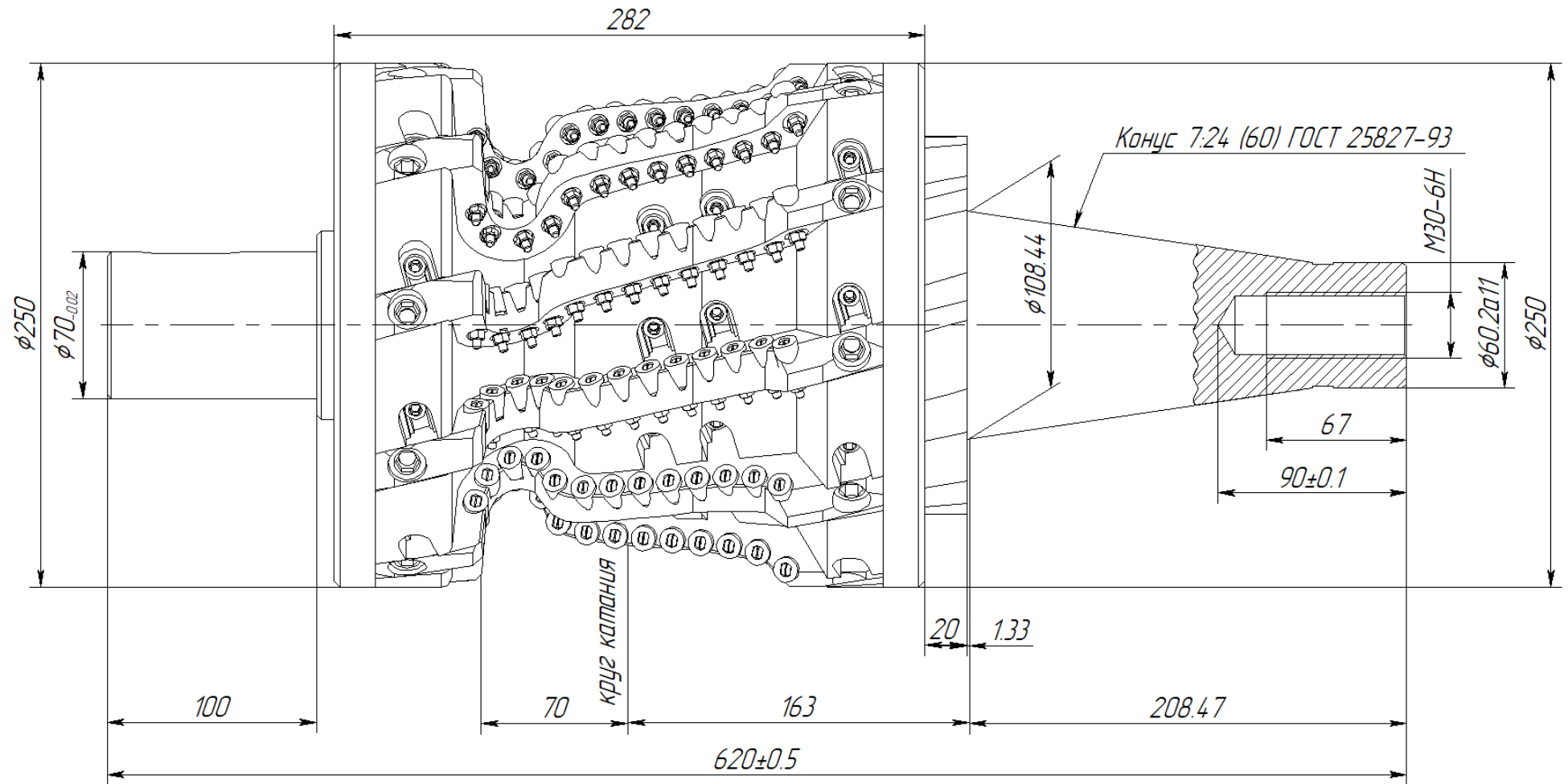


Рис. 3.6 – Рабочий чертеж сборной фасонной фрезы с СМП.

3.3. Исследование влияния конструктивных параметров сборной фасонной фрезы на процесс фрезерования профиля катания колесных пар

3.3.1. Анализ равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами

Одним из важных аспектов при использовании сборных фасонных фрез является обеспечение равномерности фрезерования. Равномерность достигается тогда, когда в зоне обработки в каждый момент времени находятся не менее двух режущих элементов. У цельных фрез это достигается за счет применения винтовых либо наклонных зубьев, которые способствуют плавной работе фрезы и снижают нагрузку на зуб по сравнению с прямозубой фрезой. Особенностью определения равномерности фрезерования для сборных фрез является необходимость обеспечения высокой точности геометрии, балансировки и контроля параметров процесса резания для равномерного снятия материала и получения высокого качества обработки. Для достижения равномерной обработки поверхности необходимо правильно подобрать параметры режимов резания, такие как скорость резания, подачу и глубину резания. Расположение СМП в корпусе сборной фрезы также оказывает влияние на равномерность обработки [26, 45]. При правильной настройке и эксплуатации сборные фасонные фрезы обеспечивают равномерность фрезерования и высокое качество обработки поверхности.

На рис. 3.7 представлены схемы попутного фрезерования фасонных деталей с прямолинейной направляющей (а) и типа тела вращения (б) дисковыми фрезами с СМП. При попутном фрезеровании направления подачи и вращения дисковой фрезы с СМП совпадают, а толщина стружки изменяется от максимального значения a_{\max} до нуля, что обеспечивает минимальную нагрузку на зуб фрезы при выходе из зоны обработки. Для обработки профиля катания колесных пар и профиля головки рельса выбирается попутное фрезерование.

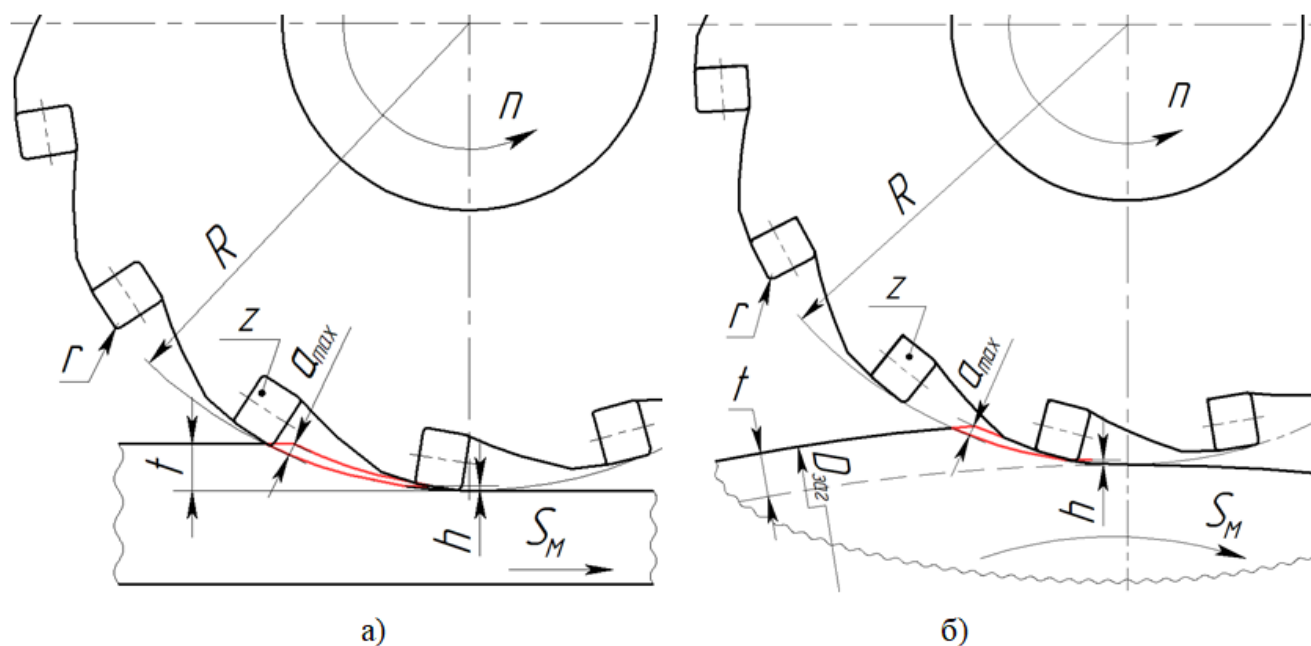


Рис. 3.7 – Схемы попутного фрезерования: прямолинейных направляющих (а) и деталей типа тела вращения (б), где S_M – подача заготовки; n – частота вращения фрезы; t – глубина резания; a_{max} – максимальная толщина стружки; R – радиус фрезы; z – количество режущих пластин; r – радиус округления режущих кромок СМП, h – глубина смятия материала заготовки ($h = r$).

Для расчета равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами поверхности фасонных деталей использована схема обработки фасонной поверхности профиля катания колесной пары. Профиль ножа сборной фасонной фрезы, оснащенного СМП, разделен на 13 отдельных участков [26, 45]. При этом для анализа равномерности фрезерования рассмотрены девять участков профиля, для которых определены величины среза $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_9$. Каждый участок моделируется как отдельная дисковая фреза, отличающаяся своим диаметром и геометрическими параметрами, при этом каждая пластина выполняет функцию отдельного зуба фрезы. На рис. 3.8 все СМП спроецированы в осевую плоскость фрезы для определения величин среза $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_9$ по соответствующим участкам профиля. В табл. 3.2 приведены численные значения величин среза $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_9$ в зависимости от глубины резания t .

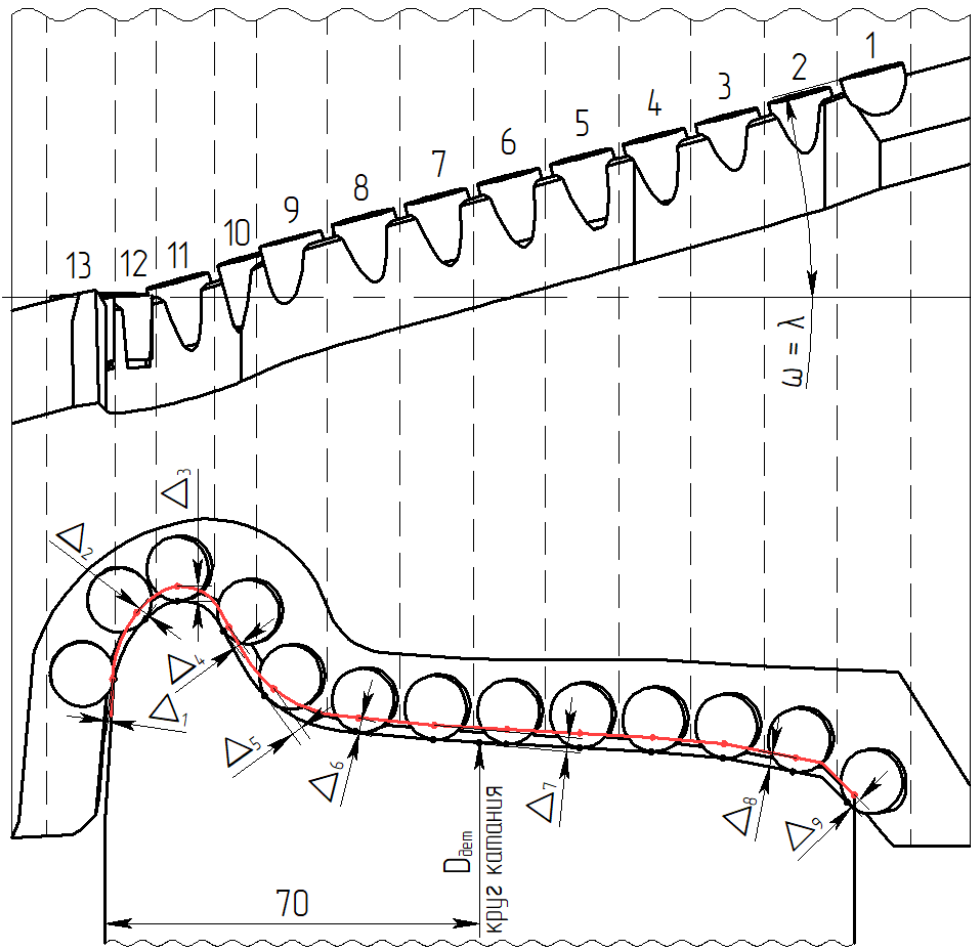


Рис. 3.8 – Схема для определения равномерности фрезерования, где ω – угол наклона ножа фрезы; λ – угол наклона СМП.

Таблица 3.2

Величины среза Δ_1 – Δ_9 в зависимости от глубины резания t .

Величина среза	Глубина резания t , мм							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Δ_1	0.152	0.257	0.315	0.325	0.358	0.38	0.397	0.411
Δ_2	0.698	1.365	2	2.608	3.184	3.729	4.243	4.726
Δ_3	0.732	1.732	2.732	3.732	4.732	5.732	6.732	7.732
Δ_4	0.355	0.84	1.325	1.81	2.295	2.78	3.265	3.75
Δ_5	0.541	1.307	2.103	2.93	3.788	4.68	5.607	6.57
Δ_6	0.737	1.744	2.75	3.759	4.766	5.773	6.78	7.787
Δ_7	0.729	1.725	2.72	3.725	4.722	5.721	6.705	7.71
Δ_8	0.722	1.709	2.68	3.682	4.668	5.655	6.624	7.63
Δ_9	0.517	1.225	1.932	2.73	3.629	4.57	5.533	6.51

Различие величин среза Δ_1 – Δ_9 при одинаковой глубине резания обусловлено геометрической неоднородностью профиля обрабатываемой поверхности колесной пары и расположением СМП в корпусе сборной фасонной фрезы.

Поскольку каждый участок профиля характеризуется своей индивидуальной кривизной и положением относительно оси вращения фрезы, то при постоянной глубине резания t происходит неравномерное распределение объема снимаемого металла между пластинами, соответствующими разным участкам профиля.

Кроме того, углы установки ножей фрезы (ω) и СМП (λ) также влияют на толщину срезаемого слоя. В результате, даже при одинаковом заданном значении глубины резания, например, $t = 3$ мм, величина среза в области Δ_2 значительно превышает соответствующее значение в области Δ_1 , что подтверждается графиком на рис. 3.9. Анализ графика показывает, что наименее нагруженными оказываются участки профиля (Δ_1 и Δ_4), в то время как остальные участки характеризуются большим съемом металла. Это связано с большей крутизной профиля в этих зонах и меньшей длине контакта между СМП и заготовкой [26, 45].

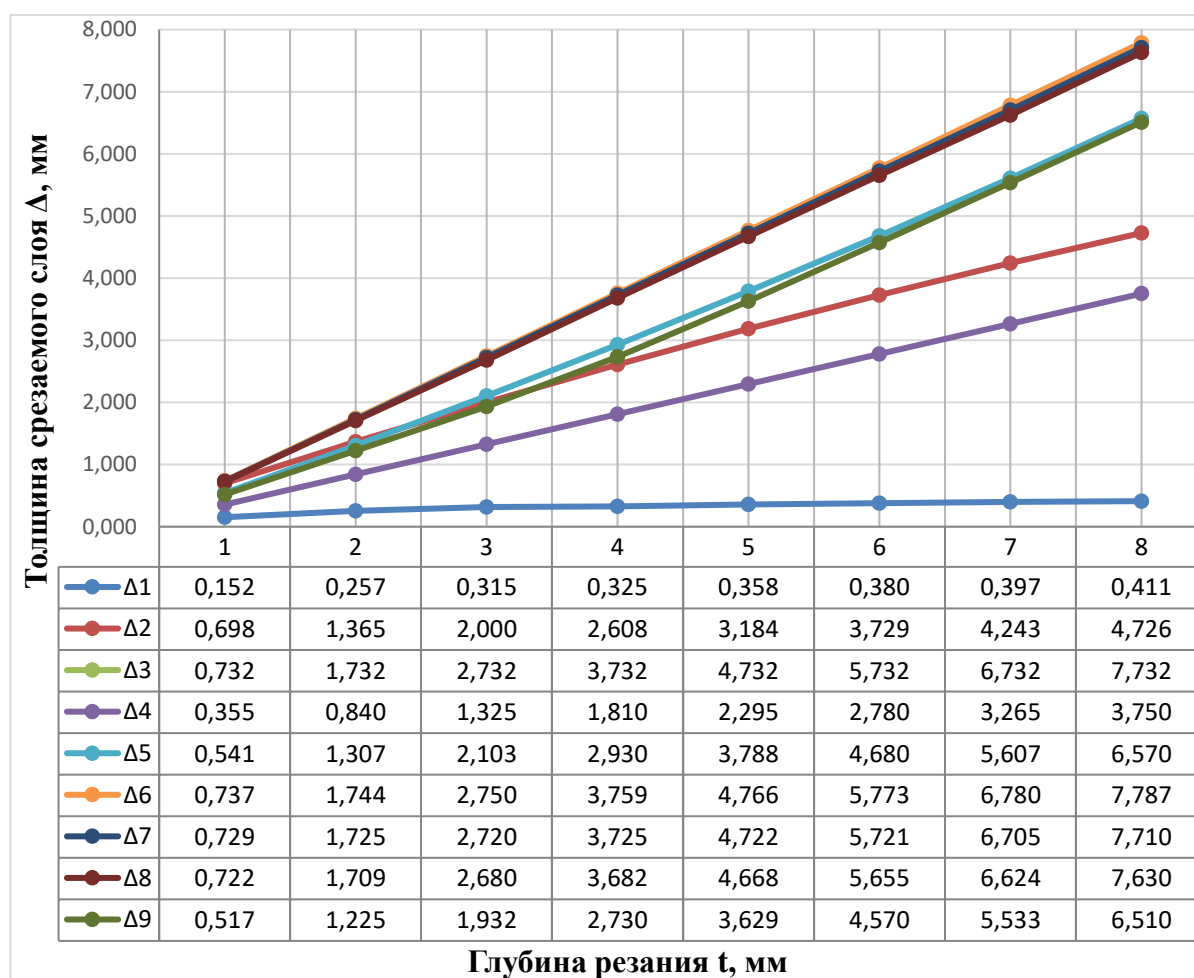


Рис. 3.9 – Зависимость величины среза Δ_1 – Δ_9 от глубины резания t .

Такая неравномерность должна быть учтена при выборе режимов резания и оптимизации конструкции фрезы для достижения равномерной нагрузки на ее зубья.

На рис. 3.10 даны схемы конструкций сборной фасонной фрезы в виде набора отдельных дисковых фрез, что позволяет имитировать работу фрезы, имеющей наклонные зубья, для деталей с прямолинейной направляющей (а) и для деталей типа тела вращения (б).

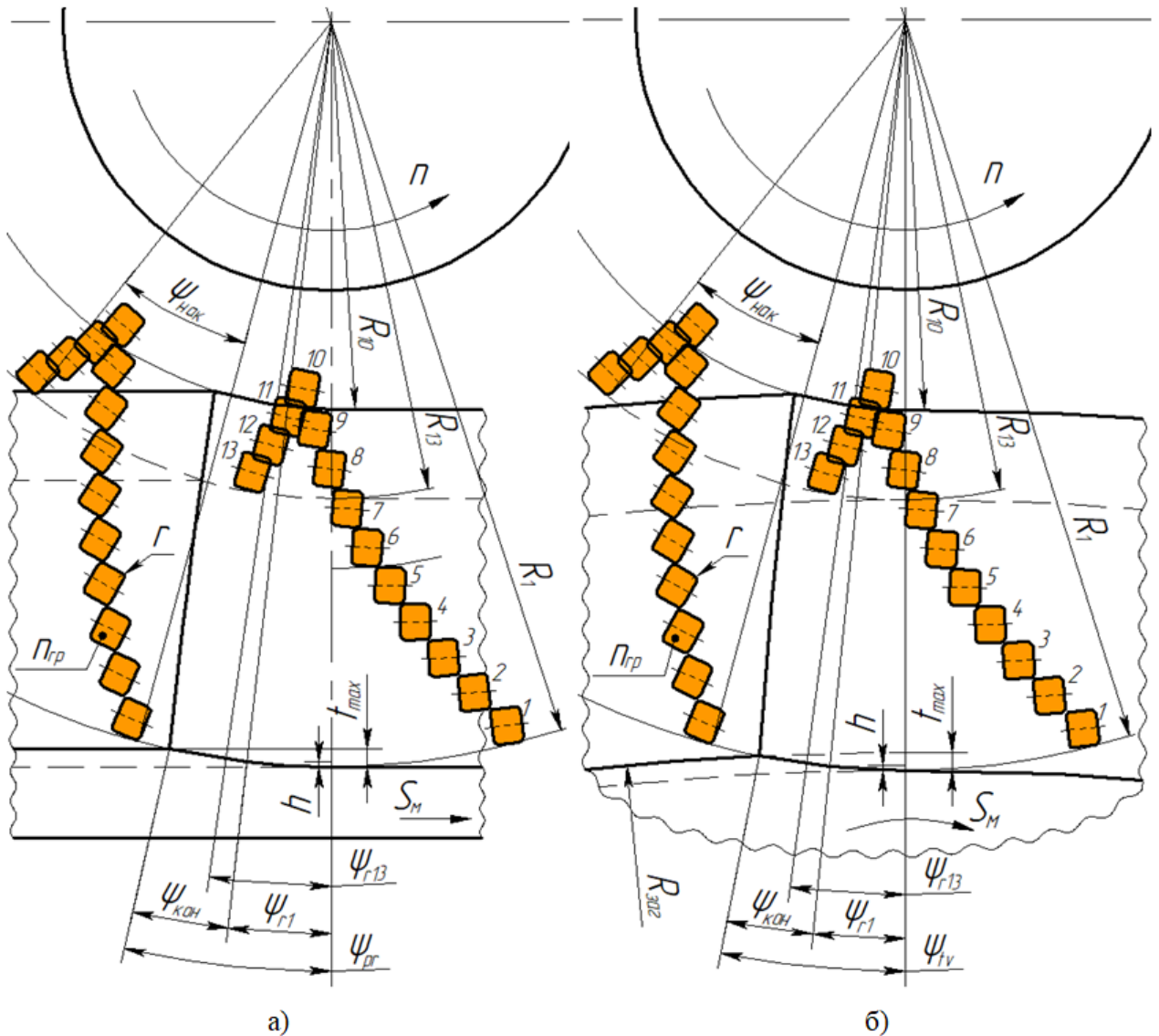


Рис. 3.10 – Схема попутного фрезерования: профиля головки рельсов (а) и колесных пар (б), где S_M – подача заготовки; n – частота вращения фрезы; $n_{гр}$ – количество режущих пластин на одном ноже; R_1 – максимальный радиус фрезы; R_{10} – минимальный радиус фрезы; R_{13} – последний радиус фрезы; t_{max} – максимальная глубина резания; r – радиус округления режущих кромок пластин; h – глубина смятия материала заготовки ($h = r$).

Исходя из вышеизложенного, установлено, что равномерность фрезерования обеспечивается при одновременном нахождении в зоне резания не менее двух пластин. Это достигается за счет наклона каждой пластины на угол λ и всего ножа на угол ω , например, при $\lambda = \omega = 15^\circ$. Благодаря этому каждая пластина входит в зону резания плавно, снижая ударные нагрузки и вибрации, что положительно сказывается на шероховатости поверхности колесной пары и ресурсе сборной фасонной фрезы [26, 45]. На рис. 3.11 представлена блок-схема алгоритма расчета равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами для обработки деталей с прямолинейной направляющей либо типа тела вращения.

В блоках 2 и 3 вводятся исходные данные: максимальный диаметр фрезы D_1 , мм; последний диаметр фрезы D_{13} , мм; диаметр режущих пластин d , мм; радиус округления режущих кромок пластин r , мм; количество зубьев (ножей) фрезы z ; максимальная глубина резания t_{\max} , мм; ширина фрезерования B , мм; угол наклона зубьев (ножей) ω , °; количество режущих пластин на одном ноже n .

В блоке 4 на основе исходных данных определяются углы наклона: Ψ_{r1} при максимальном диаметре D_1 , где происходит не резание, а смятие материала заготовки в результате трения пластины округленным участком режущей кромки; Ψ_{r13} при последнем диаметре D_{13} , где происходит смятие, а не резание.

В блоке 5 выбирается тип заготовки (с прямолинейной направляющей или тело вращения).

В блоке 6 вводится диаметр обрабатываемой заготовки типа тела вращения.

В блоке 7 рассчитывается межосевого расстояния фасонной фрезы и обрабатываемой заготовки типа тела вращения.

В блоке 8 рассчитывается угол начала контакта Ψ_{tv} режущей кромки фрезы и детали типа тело вращения.

В блоке 9 рассчитывается угол начала контакта Ψ_{pr} режущей кромки фрезы и детали с прямолинейной направляющей.

В блоке 10 рассчитываются: шаг СМП фрезы Ψ_z , °; наклон ножа на виде сбоку $\Psi_{\text{нак}}$, °; шаг ножей фрезы $\Psi_{\text{нак}z}$, °; угол, определяющий ширину зоны резания (без смятия) одного ножа фрезы $\Psi_{\text{кон}}$, °.

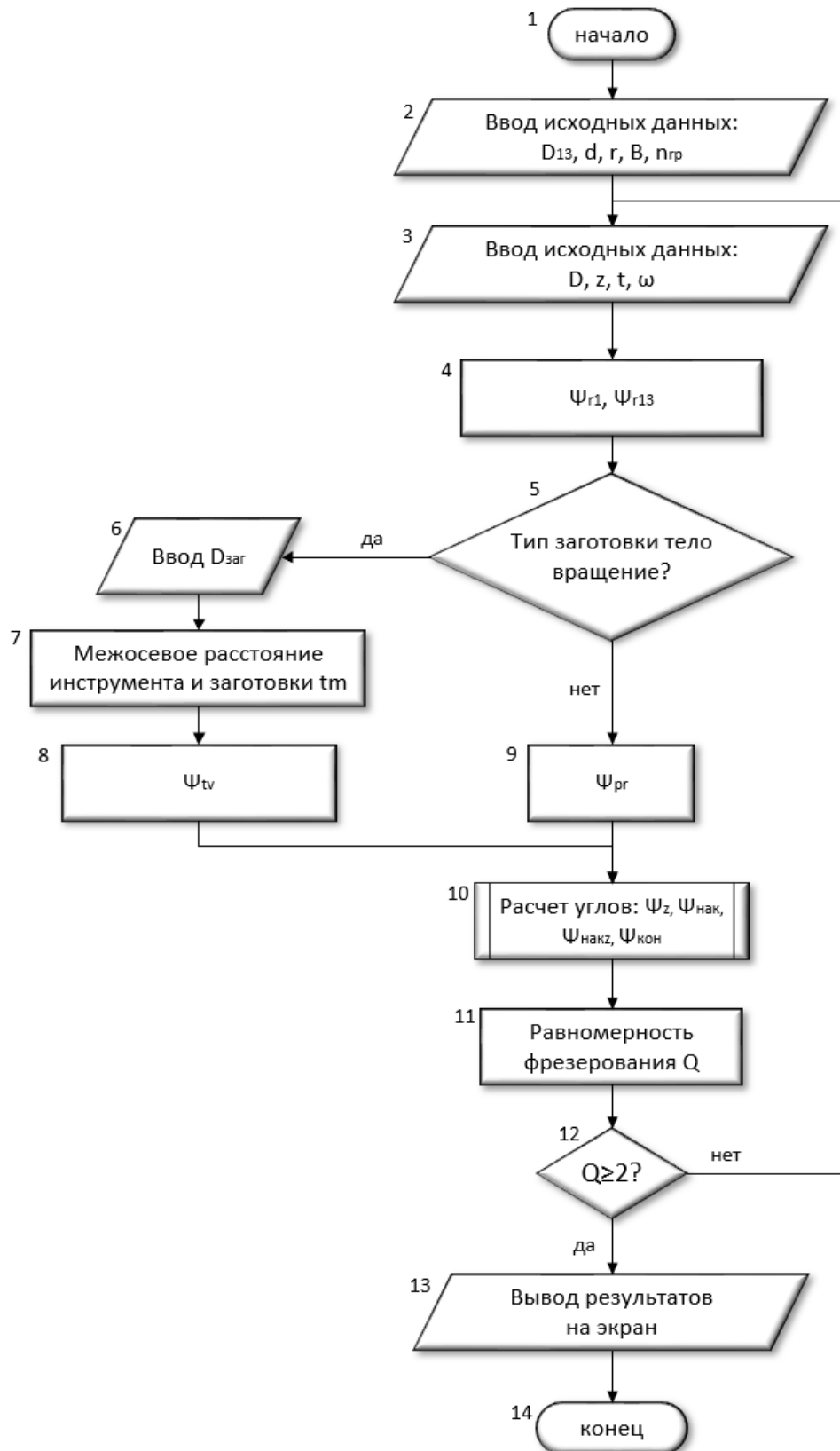


Рис. 3.11 – Блок-схема алгоритма расчета равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами.

В блоке 11 рассчитывается условие равномерности фрезерования Q .

В блоке 12 производится проверка условия равномерности фрезерования.

Если условие равномерности фрезерования не достигнуто, выполняется возврат в блок 3 с изменением исходных данных. В противном случае, происходит переход в блок 13 – вывод результатов расчета на экран.

1. Рассмотрим пример расчета равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами при обработке деталей с прямолинейной направляющей (рис. 3.10, а) [26, 45]. Исходные данные:

- Максимальный диаметр дисковой фрезы $D_1 = 250$ мм;
- Последний диаметр дисковой фрезы $D_{13} = 160$ мм;
- Количество зубьев (ножей) $z = 12$;
- Диаметр пластин $d = 12$ мм;
- Радиус округления режущей кромки (РК) пластины $r = 0.4$ мм;
- Максимальная глубина резания $t_{\max} = 3$ мм;
- Угол наклона ножей $\omega = 20^\circ$;
- Ширина фрезерования $B = 140$ мм;
- Количество пластин на одном ноже $n_{\text{гр}} = 13$.

1.1. Находим шаг СМП фрезы:

$$\psi_z = \frac{360}{z} = 30^\circ; \quad (3.15)$$

1.2. Находим угол наклона ножа на виде сбоку:

$$\psi_{\text{нак}} = \frac{(\tan(\omega) \cdot B) \cdot 360}{(\pi \cdot D_1)} = 23.356 (23^\circ 21' 22''); \quad (3.16)$$

1.3. Находим шаг каждой пластины на одном ноже:

$$m = \frac{\psi_{\text{нак}}}{n - 1} = 1.946 (1^\circ 56' 46''); \quad (3.17)$$

1.4. Режущие пластины, которые находятся на одном ноже фрезы, должны всегда обеспечивать равномерность фрезерования. Проверяется данное условие следующим способом:

$$\Psi_{\text{кон}} > 2 \cdot m; \quad (3.18)$$

т.е. в зоне резания всегда должны находиться от 2 пластин и больше. В противном случае, условие равномерности фрезерования не выполняется.

1.5. При условии выполнения формулы (3.18), шаг ножей фрезы находим по формуле:

$$\psi_{\text{накз}} = \psi_z - \psi_{\text{нак}} = 6.644 (6^\circ 38' 38''); \quad (3.19)$$

1.6. Угол зоны резания зуба фрезы:

$$\psi_{\text{кон}} = \psi_{pr} - \psi_{r13} = 6.846 (6^\circ 50' 46''); \quad (3.20)$$

1.7. Условие равномерности фрезерования для деталей с прямолинейной направляющей по формуле:

$$Q = \frac{\psi_{\text{кон}}}{\psi_{\text{накз}}} = 1.03 \quad (3.21)$$

Полученное значение Q округляется до большего целого числа ($Q = 2$). Условие равномерности фрезерования выполняется, если $Q \geq 2$.

2. Рассмотрим пример расчета равномерности фрезерования сборными фасонными фрезами при обработке деталей типа тело вращения (рис. 3.10, б) [26, 45]. Диаметр заготовки $D_{\text{заг}} = 963$ мм, остальные исходные данные приведены в п. 1.

2.1. Определим межосевое расстояние фрезы и заготовки:

$$t_m = (R_1 + R_{\text{заг}}) - t_{\text{max}} = 603.5 \text{ мм}; \quad (3.22)$$

2.2. Угол начала контакта зубьев фрезы с заготовкой:

$$A_1 = \frac{R_1^2 - R_{\text{заг}}^2 + t_m^2}{2 \cdot t_m} = 122.614 \text{ мм}; \quad (3.23)$$

$$B_1 = \sqrt{R_1^2 - A_1^2} = 24.307 \text{ мм}; \quad (3.24)$$

$$\psi_{tv} = \arcsin\left(\frac{B_1}{R_1}\right) = 11.213 (11^\circ 12' 47''); \quad (3.25)$$

2.3. Находим угловую величину участка, где начинается непосредственно процесс резания:

$$\psi_{\text{кон}} = \psi_{tv} - \psi_{r13} = 5.481 (5^\circ 28' 52''); \quad (3.26)$$

2.4. Выполняем остальные расчеты по формулам (3.15–3.19) и (3.21).

Значение, полученное по формуле (3.26), округляется в большую сторону до целого числа. Условие равномерности фрезерования выполняется при $Q \geq 2$.

В сборных фрезах режущие пластины размещены таким образом, чтобы они перекрывали друг друга. Это достигается путем наложения проекций режущих пластин, расположенных на соседних ножах (зубьях), друг на друга при проецировании их в осевую плоскость фрезы. Перекрытие режущих пластин позволяет более равномерно распределить нагрузку на фрезу и уменьшить высоту остаточных неровностей на обрабатываемой поверхности [26, 45].

На основе алгоритма расчета равномерности фрезерования, была разработана программа и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [85].

Исходя из вышеописанного, можно определить перечень мероприятий, направленных на обеспечение выполнения условия равномерности фрезерования:

- увеличение угла наклона режущих пластин ω ;
- увеличение количества зубьев (ножей) фрезы z ;
- уменьшение максимального диаметра фрезы D_1 .

3.3.2. Исследование точности и шероховатости обработанной поверхности профилей катания колесных пар

Выполнив анализ конструкций сборных фасонных фрез с круглыми пластинами для обработки колесных пар, была выбрана конструкция фасонной фрезы с диаметром $\varnothing 250$ мм с 10 ножами для дальнейших исследований. Перечень конструктивных параметров сборной фасонной фрезы с СМП представлен в табл. 3.3.

Сборные фасонные фрезы с СМП настраиваются вне станка для обеспечения максимальной точности обработки профиля катания колесных пар. Схема настройки представлена на рис. 3.12. Сборная фасонная фреза устанавливается на стенд с помощью оправки 1 и центрируется в конусах 2 и 3. Настройка осуществляется с использованием индикатора часового типа 4 по специальному шаблону 5.

Перечень конструктивных параметров сборной фасонной фрезы с СМП.

Профиль катания (бандажа) колесных пар	Колесные пары МВПС
Материал колесных пар	Ст2
Ширина профиля колеса	140 мм
Толщина гребня	33±0.3 мм
Угол наклона ножей	$\omega = 15^\circ$
Количество пластин	130 шт
Инструментальный материал	корпуса и ножей – Сталь 40Х, пластин – Т14К8
Размер сменных многогранных пластин	d = 12 мм – диаметр; R = 0.2 мм – радиус округления РК; L = 12 мм – длина.
Количество пластин на ноже	13 шт
Геом. параметры положения пластин в сборке	$\gamma = -8^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\omega = \lambda = 15^\circ$; P = 14 мм.

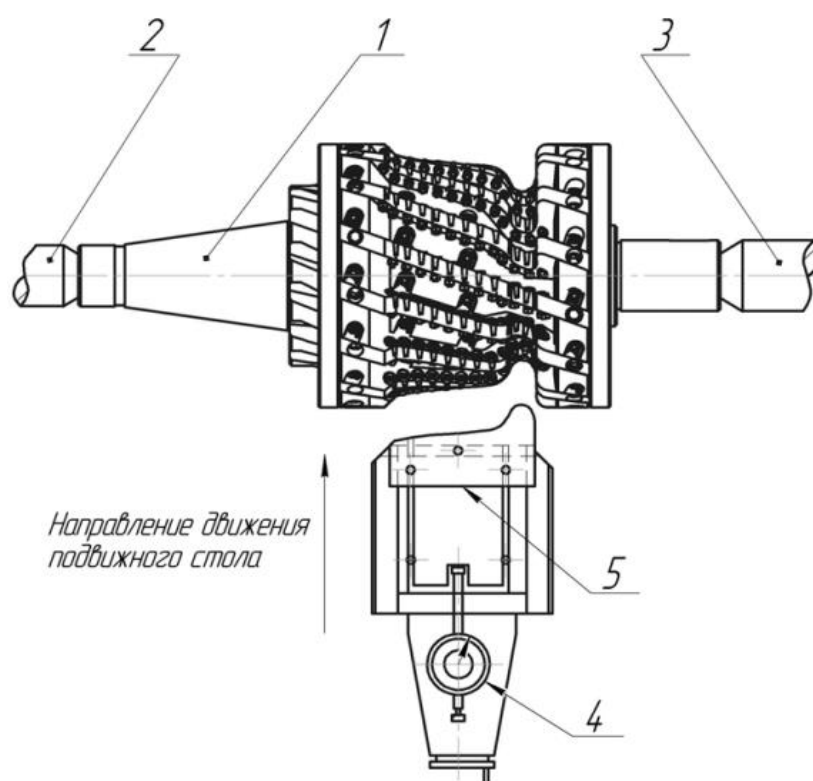


Рис. 3.12 – Схема настройки сборной фасонной фрезы с СМП вне станка.

На рис. 3.13 представлена блок-схема расчета высоты остаточных неровностей после обработки колесных пар сборными фасонными фрезами.

В блоке 2 выбирается способ крепления СМП;

В блоке 3 выбирается участок обрабатываемой поверхности профиля катания колесных пар (радиусная или прямолинейная образующая);

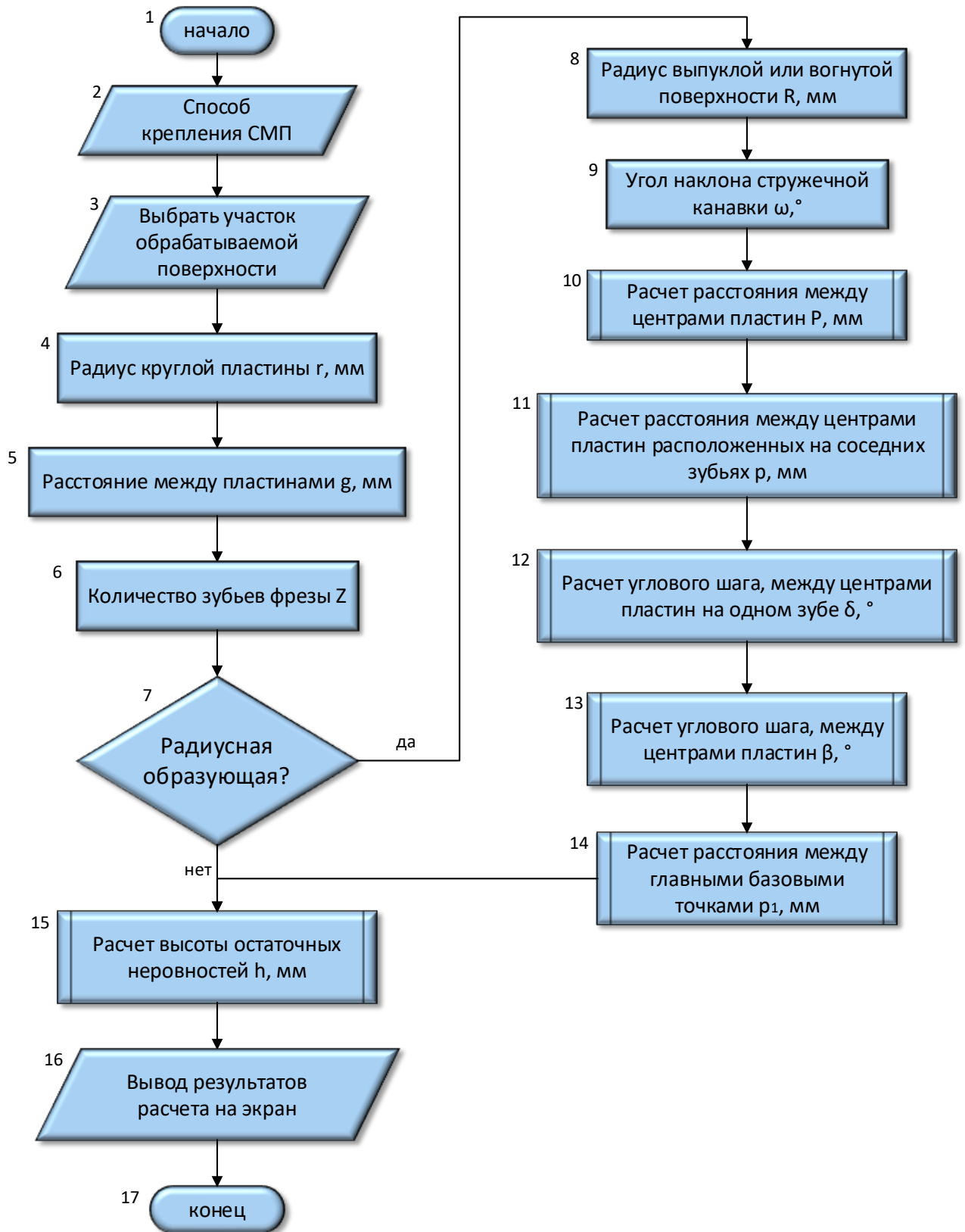


Рис. 3.13 – Блок-схема расчета высоты остаточных неровностей.

В блоке 4 выбирается радиус круглой пластины r , мм;

В блоке 5 выбирается расстояние между пластинами, расположенными на одном зубе g , мм;

В блоке 6 выбирается количество зубьев фрезы Z ;

В блоке 7 выбирается обрабатываемый участок (вогнутый, выпуклый или прямолинейный участок);

В блоке 8 выбирается радиус обрабатываемой выпуклой или вогнутой поверхности R , мм;

В блоке 9 выбирается угол наклона стружечной канавки ω , °;

В блоке 10 рассчитывается расстояние между центрами пластин P , мм;

В блоке 11 рассчитывается расстояние между центрами пластин, расположенных на соседних зубьях p , мм;

В блоке 12 рассчитывается угловой шаг между центрами пластин расположенными на одном зубе δ , °;

В блоке 13 рассчитывается угловой шаг между центрами пластин, расположенных на соседних зубьях, измеренный в осевой плоскости фасонной фрезы β , °;

В блоке 14 рассчитывается расстояние между главными базовыми точками p_1 , мм;

В блоке 15 рассчитывается высота остаточных неровностей по выбранным параметрам h , мм;

В блоке 16 полученные результаты расчета выводятся на экран.

Высота остаточных неровностей поверхности катания колесных пар при обработке сборными фасонными фрезами, зависит в первую очередь от угла перекрытия ножом фасонной фрезы, т.е. от того, насколько близка огибающая поверхность к заданному профилю рабочей поверхности колеса. Высота остаточных неровностей после обработки колесных пар в вогнутых и выпуклых участках должны быть минимальными. Это достигается при оптимальном взаимном расположении круглых пластин. В данном случае конструкция ножей позволяет нам расположить на каждом ноже по 13 круглых пластин диаметром $d = 12$ мм, межосевое расстояние которых равен $P = 14$ мм.

Условно делим профиль колеса на 5 участков (рис. 3.14).

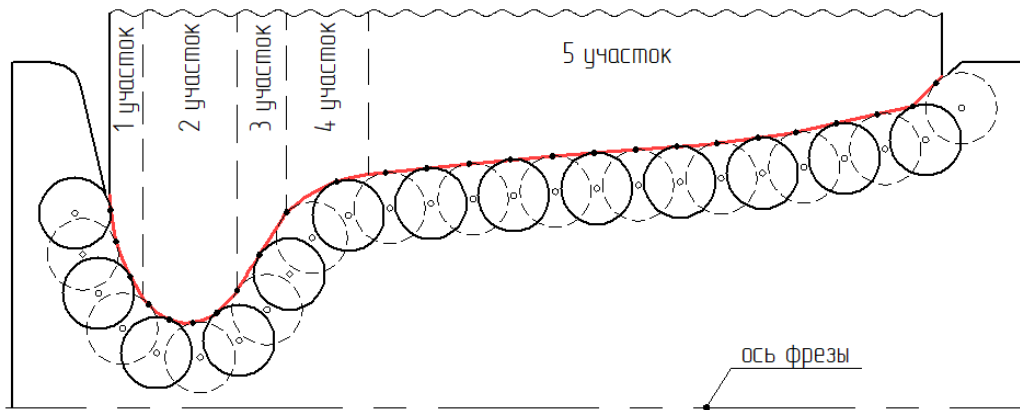


Рис. 3.14 – Профиль колеса, разделенный на 5 участков.

Участок № 1 – вогнутый профиль радиусом $R_{\text{вог1}} = 45$ мм.

Участок № 2 – вогнутый профиль радиусом $R_{\text{вог2}} = 12.5$ мм.

Участок № 4 – выпуклый профиль радиусом $R_{\text{вып}} = 15$ мм.

Участки № 3 и 5 – прямолинейный профиль.

На рис. 3.15 показана схема расположения СМП на выпуклой поверхности профиля обрабатываемой детали (участки № 1 и № 2).

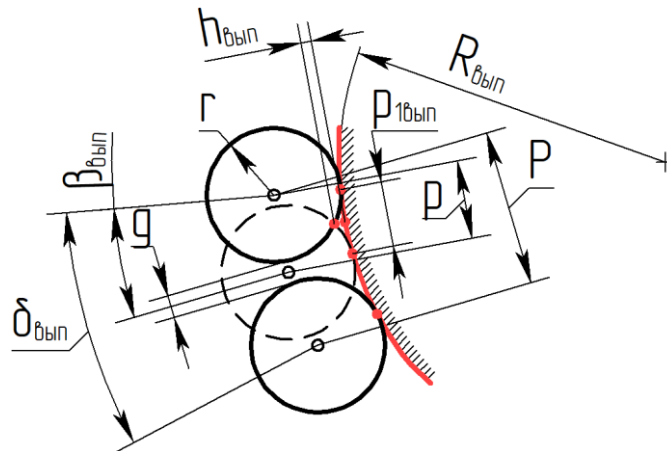


Рис. 3.15 – Схема расположения СМП на выпуклой поверхности обрабатываемой детали.

Высота остаточных неровностей h после обработки детали для выпуклых поверхностей рассчитывается по формуле [25]:

$$h_{\text{вып1,2}} = \frac{r \cdot \sin \left[180 - \left[\frac{\beta_{\text{вып1,2}}}{2} + \left[180 - \arcsin \left[\frac{(R_{\text{вып1,2}} + r) \cdot \sin \left(\frac{\beta_{\text{вып1,2}}}{2} \right)}{r} \right] \right] \right]}{\sin \left(\frac{\beta_{\text{вып1,2}}}{2} \right)} - R_{\text{вып1,2}}; \quad (3.27)$$

На рис. 3.16 показана схема расположения СМП на вогнутой поверхности

профиля обрабатываемой детали (участок № 4).

Высота остаточных неровностей h после обработки детали для вогнутых поверхностей рассчитывается по формуле [25]:

$$h_{\text{вог}} = R_{\text{вог}} - \frac{r \cdot \sin \left[\frac{\beta_{\text{вог}}}{2} + \arcsin \left[\frac{(R_{\text{вог}} - r) \cdot \sin \left(\frac{\beta_{\text{вог}}}{2} \right)}{r} \right] \right]}{\sin \left(\frac{\beta_{\text{вог}}}{2} \right)} \quad (3.28)$$

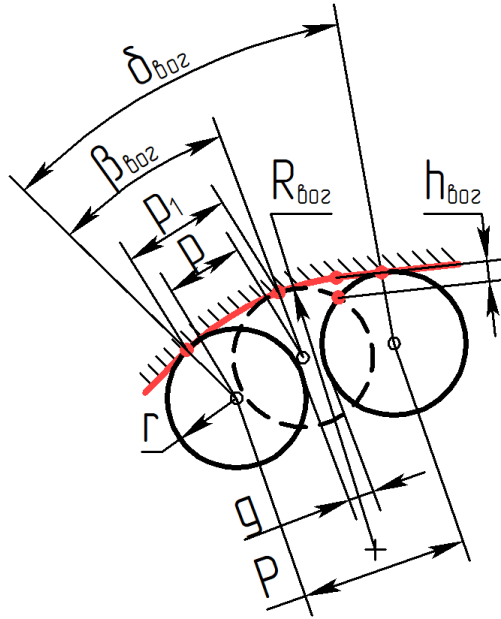


Рис. 3.16 – Схема расположения СМП на вогнутой поверхности обрабатываемой детали.

На рис. 3.17 показана схема расположения СМП на прямолинейной поверхности профиля обрабатываемой детали (участки № 3 и № 5).

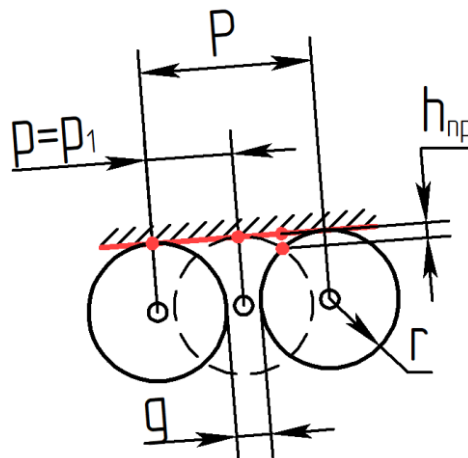


Рис. 3.17 – Схема расположения СМП на прямолинейной поверхности профиля обрабатываемой детали.

Высота остаточных неровностей $h_{пр}$ после обработки детали для прямолинейных поверхностей рассчитывается по формуле [25]:

$$h_{пр} = r - \sqrt{r^2 - \frac{(2 \cdot r + g)^2}{4 \cdot z^2}}. \quad (3.29)$$

Рассчитанные по формулам (3.27) – (3.29) значения сведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Полученные значения высоты остаточных неровностей по проведенным расчетам.

№ участка	1	2	3 и 5	4
Радиус обрабатываемого выпуклого или вогнутого профиля R, мм	45	12.5	–	15
Высота остаточных неровностей после обработки сборными фасонными фрезами с СМП h, мм	0.036	0.029	0.043	0.089

Согласно требованиям ГОСТ 11018-2011 [10] для колесных пар колеи 1520 мм в качестве критерия точности принимаем допуск на обрабатываемый профиль $T_{дет} = 0.3$ мм. Сборная фасонная фреза с СМП относится к инструментам первого порядка, и по принятой в проектировании режущего инструмента схеме распределения допуска [88] ее вклад должен составлять около одной трети допуска детали. Тогда максимально допустимая погрешность, вносимая фрезой в формирование профиля, составляет $\Delta_{инстр}^{max} \approx 0.1$ мм.

Погрешность, создаваемая сборной фасонной фрезой с СМП, определяется геометрической точностью корпуса, пазов под пластины, опорных и прижимных поверхностей, самих пластин, погрешностями закрепления, а также упругими деформациями под нагрузкой. Согласно ГОСТ 19042-80 [12], предельные отклонения размеров d и t для применяемых пластин с диаметром вписанной окружности 12.7 мм (классы допусков M, N) составляют ± 0.08 и ± 0.15 мм соответственно. При рациональной конфигурации посадочного места только часть поля допуска по диаметру вписанной окружности реализуется в радиальном и осевом смещении режущей кромки, поэтому вклад геометрической погрешности самой пластины можно оценочно ограничить уровнем $\Delta_{пл} \leq 0.05$ мм.

В ГОСТ 28719-90 [17] допуск радиального биения режущих кромок относительно оси посадочного отверстия установлен: 0.1 мм по цилиндрической части и 0.08 мм по торцовой пластине. Эти значения задают реальный уровень суммарной геометрической погрешности фрезы в сборе, на который и ориентируемся при назначении допуска $\Delta_{инстр}$.

На основе разработанной блок-схемы (рис. 3.13), а также проведенных расчетов по формулам (3.27–3.29), была создана программа для ЭВМ, реализующая алгоритм расчета высоты остаточных неровностей обработанной поверхности профиля катания колесных пар. Программа позволяет выбирать геометрию обрабатываемых участков, параметры установки СМП и производить вычисления высоты неровностей для различных участков профиля (вогнутых, выпуклых и прямолинейных). Разработанная программа успешно прошла тестирование и оформлено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [84].

3.4. Совершенствование конструкции сборной фрезы для повышения стойкости и производительности обработки фасонных деталей

3.4.1. Обоснование выбора конструктивных параметров сборной фрезы

На основании проведенного анализа в качестве перспективного метода восстановления фасонных деталей мобильных колесных платформ выбран метод фрезерования сборными фасонными фрезами с СМП, обеспечивающий долговечность, высокую производительность и точность обработки. Однако сложность проектирования и изготовления, трудоемкая настройка вне станка при замене ножей или изношенных СМП, необходимость дополнительного оборудования из-за большого веса фрезы (от 85 кг в сборе), а также высокая стоимость делают ее применение во многих случаях экономически нецелесообразным. В связи с этим принято решение о разработке специальной

конструкции дисковой фрезы с СМП.

Такой инструмент позволяет объединить достоинства токарных резцов с СМП и сборных фасонных фрез с СМП. Дисковая фреза с СМП обладает сравнительно простой конструкцией, не требует настройки вне станка для обработки различных типов фасонных профилей деталей благодаря применению станков с ЧПУ, имеет малый вес (менее 3 кг) и доступную стоимость.

В качестве режущих зубьев планировалось использовать тангенциальные пластины LNMХ 301940-23 VH5612 или их аналоги, применяемые при токарной обработке колесных пар. Их выбор обусловлен высокой стойкостью, стабильностью размеров и качеством обработанной поверхности в условиях интенсивного резания.

Однако для обеспечения малого веса дисковой фрезы (менее 3 кг) ее диаметр должен находиться в диапазоне 80–200 мм (ГОСТ 26595-2014 [14]). В ходе проектирования выявлено, что крупные габариты и значительный вес тангенциальных пластин LNMХ не соответствуют требованиям по компактности инструмента. Кроме того, их высокая стоимость существенно увеличивает цену всей фрезы, что снижает экономическую эффективность решения в условиях серийного производства.

С учетом выявленных недостатков было принято решение отказаться от использования данных пластин, применяемых при токарной обработке колесных пар, и выбрать более компактные и экономически оправданные альтернативы. В качестве основных режущих элементов были выбраны тангенциальные СМП LNНУ 1306 или их аналоги. Для обработки наружной части гребня применяются радиальные пластины НМ90 АДКТ 1505PDR или их аналоги.

Выбор радиальных пластин обусловлен тем, что они используются только для обработки внешнего участка гребня и/или реборды колесной пары, который составляет порядка 10% от общей длины профиля. Основной объем обработки осуществляется более компактными и технологичными тангенциальными пластинами. В табл. 3.5 представлено сравнение основных параметров всех рассмотренных типов пластин, что подтверждает обоснованность принятого

конструкторского решения.

Таблица 3.5

Сравнение основных параметров всех рассмотренных пластин.

Тип пластины	LNMX	LNHU	HM90 ADKT
Диаметр вписанной окружности, мм	12	13	9.65
Длина главной режущей кромки, мм	30	13	14.5
Толщина, мм	19	7	6
Радиус при вершине режущей кромки, мм	4	0.8	0.8
Форма и угол при вершине	L – прямоугольная 90°	B – прямоугольная, 82°	A – прямоугольная, 85°
Задний угол α , °	0	0	15
Количество режущих кромок	8	4	2
Тип обработки	Черновая	Черновая и получистовая	Черновая и получистовая
Обрабатываемые материалы	Сталь (P10-P40)	Сталь, нержавеющая сталь, чугун, жаропрочные сплавы	Сталь, нерж. сталь, чугун, жаропрочные сплавы, закал. сталь
Максимальная глубина резания	до 12 мм	до 11 мм	до 12 мм
Применение	Токарная обработка колесных пар	Фрезерование уступов, плоскостей, пазов	Фрезерование в тяжелых условиях.

3.4.2. Обоснование выбора геометрических параметров сборной фрезы

Выбор геометрических параметров зубьев разрабатываемой конструкции дисковой фрезы с СМП производился с учетом требований стандартов и особенностей фасонной обработки профиля катания колесной пары.

Передний угол γ определяется конструктивной геометрией применяемых пластин. Для стороны фрезы с пластинами LNLU 1306, имеющими отрицательную геометрию, γ принят равным 0°, при этом положительный эффективный угол резания обеспечивается за счет геометрии стружколома +28°. Для стороны с пластинами HM90 ADKT 1505PDR передний угол составляет

$\gamma = -2^\circ$, однако за счет положительного наклона стружколома также достигается положительный эффективный угол равный $+16^\circ$.

Задний угол α назначен с учетом компенсации кривизны обрабатываемого профиля и предотвращения трения задней поверхности режущей кромки фрезы. Для стороны фрезы с пластинами LNНU 1306 принят $\alpha = 10^\circ$, для стороны с пластинами НМ90 АДКТ 1505PDR $\alpha = 15^\circ$, что обеспечивает достаточный зазор с обрабатываемой поверхностью на участках с выраженной кривизной.

При обработке фасонного профиля необходимо обеспечение условия геометрической проходимости режущей части сборной дисковой фрезы вдоль обрабатываемой поверхности с сохранением требуемой конструкционной прочности и жесткости конструкции. С этой целью для обеих сторон фрезы главным углом в плане принято значение $\varphi = 90^\circ$. Вспомогательный угол в плане φ_1 выбран с учетом различий в геометрии режущих кромок. Для стороны с пластинами LNНU 1306 принято значение $\varphi_1 = 2.5^\circ$. Для стороны с пластинами НМ90 АДКТ 1505PDR, имеющими винтовую форму режущей кромки, вспомогательный угол уменьшен до $\varphi_1 = 1^\circ$.

На разработанные конструкции дисковых фрез с СМП (рис. 3.18) для обработки фасонных деталей были зарегистрированы патенты на полезные модели [58, 64]. В среде T-Flex CAD с использованием методики проектирования, описанной в настоящей работе, была создана параметрическая конструкция дисковой фрезы с СМП для обработки фасонных деталей мобильных колесных платформ.

На рис. 3.19 показан изготовленный опытный образец дисковой фрезы с СМП. Соответствующая конструкторско-технологическая документация приведена в Приложении № 1.

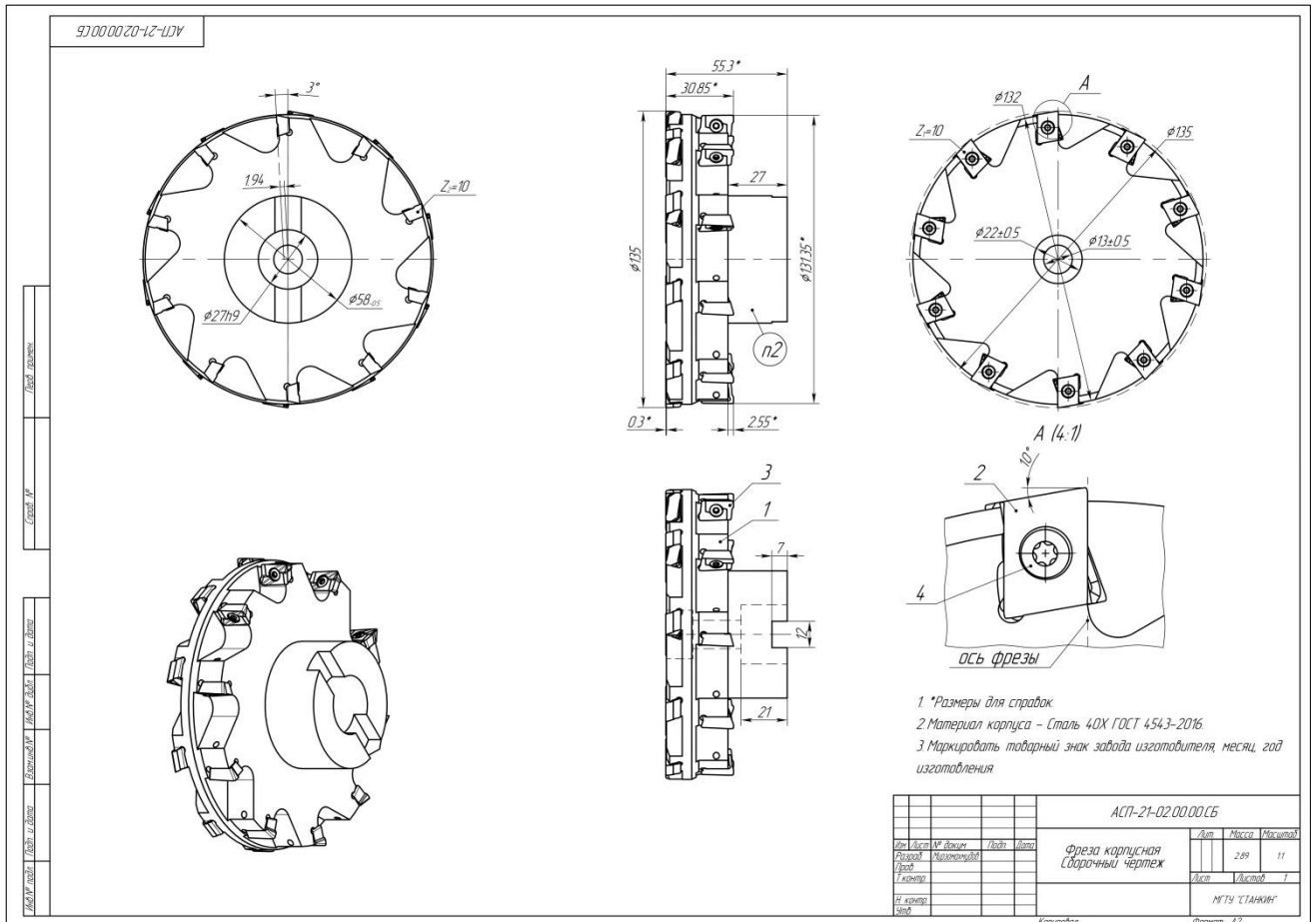


Рис. 3.18 – Конструкция дисковой фрезы с СМП для обработки фасонных деталей мобильных колесных платформ.

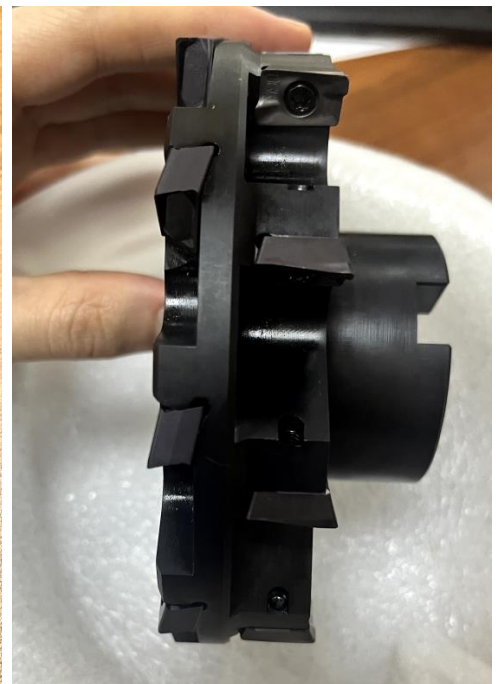


Рис. 3.19 – Опытный образец дисковой фрезы с СМП.

3.4.3. Теоретический анализ формирования остаточной микрогеометрии при фрезоточении

На основании расчетов, а также построенной блок-схемы определения высоты остаточных неровностей поверхности, выполнен теоретический анализ формирования остаточной микрогеометрии при фрезоточении [46, 49], осуществляемом сборной дисковой фрезой с прямолинейными режущими кромками.

Рассмотрим операцию фрезоточения профиля катания колесных пар сборной дисковой фрезой, оснащенной z режущими пластинами с прямолинейной режущей кромкой и имеющей углы в плане φ и φ_1 , измеряемые в осевой плоскости. Локальная система координат СМП расположена в теоретической вершине A (без учета радиуса r_e), которая является формообразующей точкой. Обработка ведется с подачей на зуб S_z . Схема формирования остаточных микронеровностей приведена на рис. 3.20.

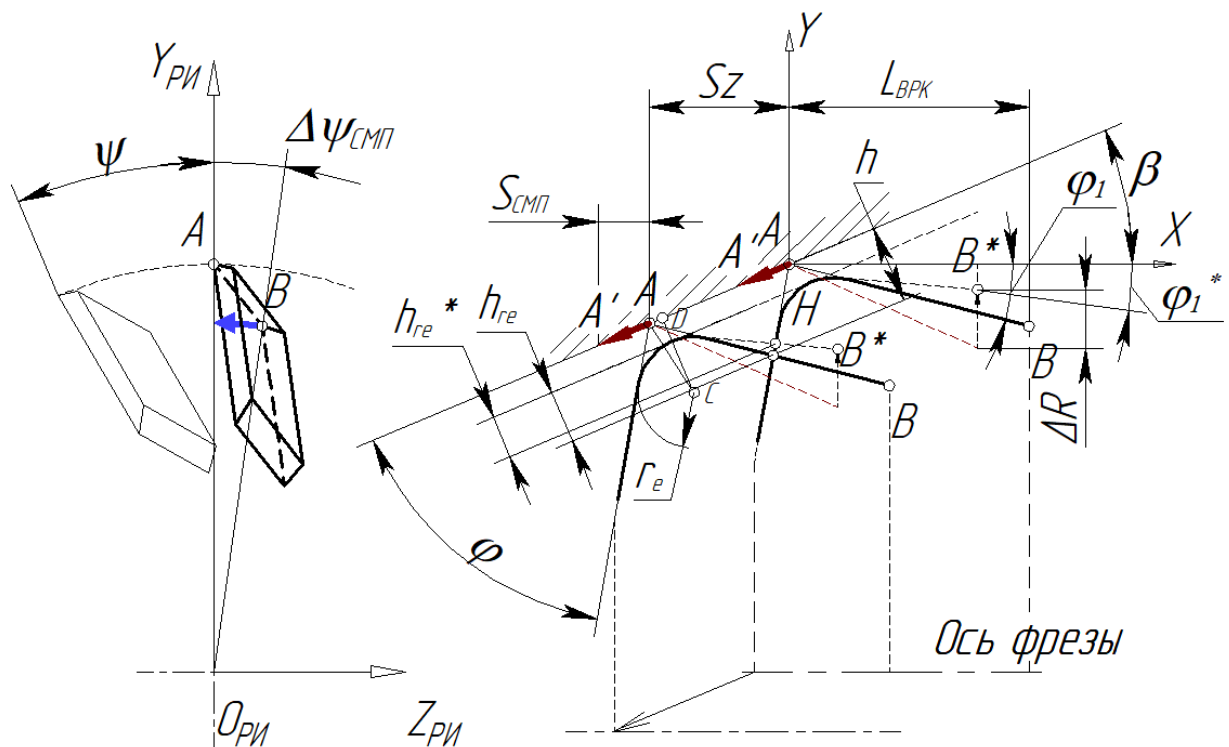


Рис. 3.20 – Расчетная схема высоты остаточных микрогребешков при фрезоточении.

В работе [27] приведена формула для расчета теоретической высоты остаточных микрогребешков при фрезоточении, справедливая при условии отсутствия радиуса r_e на вершине пластины параллельности режущей кромки СМП оси фрезы (т.е. при нулевом осевом переднем угле):

$$h = \frac{S_z}{\cos(\text{ctg}\beta) \cdot (\text{ctg}(\varphi - \beta) + \text{ctg}(\varphi_1 + \beta))}; \quad (3.30)$$

где β – угол конусности обрабатываемой поверхности. Для рассматриваемой конструкции сборной дисковой фрезы и величины подачи на зуб, равной $S_z = 0.35$ мм/зуб

При наличии радиуса r_e формула изменяется:

$$h_{re} = \frac{S_z}{\cos(\text{ctg}\beta) \cdot (\text{ctg}(\varphi - \beta) + \text{ctg}(\varphi_1 + \beta))} - \left(\frac{r_e}{\sin\left(180^\circ - \frac{\varphi + \varphi_1}{2}\right)} \cdot \cos\left(90^\circ - \left(\beta + \frac{\varepsilon}{2} + \varphi_1\right)\right) - r_e \right); \quad (3.31)$$

где ε – угол при вершине СМП.

Пусть пластина ориентирована в корпусе фрезы под углом ω_{oc} , представляющим собой осевой передний угол. Угловой шаг между СМП на соседних зубьях фрезы равен ψ . Длина проекции вспомогательной режущей кромки, измеряемая в осевой плоскости вдоль направления оси AX равна $L_{врк}$.

Предположим, что сборная дисковая фреза обрабатывает конический участок профиля детали, имеющий угол наклона β к оси AX . Из-за наличия осевого угла ω_{oc} режущая кромка AB пересекает радиальную рабочую плоскость OA (плоскость формообразования) не мгновенно, а постепенно. В начальный момент точка A режущей кромки лежит на плоскости формообразования OA . По мере обработки фреза движется в направлении вектора AA' , направленного вдоль образующей заготовки, и одновременно вращается с частотой n . Окончание работы текущей СМП соответствует моменту прохождения точки режущей кромки B через плоскость формообразования. К этому моменту фреза поворачивается относительно начального положения на угол $\Delta\psi_{СМП}$ и смещается

вдоль вектора AA' на расстояние $S_{\text{СМП}}$, равное:

$$S_{\text{СМП}} = \frac{\Delta\psi_{\text{СМП}} \cdot Sz}{\psi} \text{ мм}; \quad (3.32)$$

Угол $\Delta\psi_{\text{СМП}}$, равен:

$$\Delta\psi_{\text{СМП}} = 90 - \text{arctg} \left(\frac{z_{\text{ВРИ}}}{y_{\text{ВРИ}}} \right), \quad (3.33)$$

где $y_{\text{ВРИ}}$, $z_{\text{ВРИ}}$ – координаты точки В, измеряемые в плоскости $Y_{\text{ри}}O_{\text{ри}}Z_{\text{ри}}$ системы координат фрезы $O_{\text{ри}}$. Координаты точек А и В режущей кромки СМП в системе координат фрезы $O_{\text{ри}}$ рассчитываются с помощью матриц преобразований, описанных в 3.2.2. Для данных условий $y_{\text{ВРИ}} = 67.5$ мм, $z_{\text{ВРИ}} = 1.33$ мм. Соответственно, $\Delta\psi_{\text{СМП}} = 1.13^\circ$. Тогда расстояние $S_{\text{СМП}}$, рассчитываемое по формуле (3.32) равно:

$$S_{\text{СМП}} = \frac{1.13 \cdot 0.35}{36} = 1.06 \cdot 10^{-4} \text{ мм};$$

При наличии в конструкции сборной фрезы осевого угла наклона пластины ω имеет место эффект образования участка поверхности гиперболического профиля. В рассматриваемом случае данный эффект приводит к изменению (уменьшению) высоты остаточной неровности. Высота гиперболического участка в осевой плоскости равна разнице фактических радиусов окружностей, по которым вращаются точки режущей кромки А и В. Согласно методике, приведенной в работе [34], фактический радиус вращения точки В равен:

$$R_B = \sqrt{z_{\text{ВРИ}}^2 + y_{\text{ВРИ}}^2} \text{ мм}; \quad (3.34)$$

Тогда высота гиперболического участка равна:

$$\Delta R = |y_{\text{ВРИ}} - R_B|, \text{ мм}. \quad (3.35)$$

Таким образом, точка В пересекает плоскость формообразования в положении B^* в координатной плоскости ХАУ:

$$\begin{cases} x_B^* = x_B - S_{\text{СМП}}, \\ y_B^* = y_B - S_{\text{СМП}} \cdot \text{tg} \beta + \Delta R. \end{cases} \quad (3.36)$$

Следовательно, фактическая величина вспомогательного угла ϕ_1 равна ϕ_1^* , который рассчитывается по формуле:

$$\varphi_1^* = \operatorname{arctg} \frac{y_B^*}{x_B^*}, \quad (3.37)$$

где y_B^* , x_B^* – координаты точки B^* в координатной плоскости XAY . Для данных условий $x_B^* = 12.94$ мм, $y_B^* = 0.56$ мм, $\Delta R = 3.51 \cdot 10^{-4}$ мкм. Соответственно, $\varphi_1^* = 1.528^\circ$.

Тогда формула расчета теоретической высоты остаточных микрогребешков при наличии радиуса r_e приобретает следующий вид:

$$h_{re}^* = \frac{S_z}{\cos(\operatorname{ctg}\beta) \cdot (\operatorname{ctg}(\varphi - \beta) + \operatorname{ctg}(\varphi_1^* + \beta))} - (DC - r_e), \quad (3.38)$$

$$\text{где величина } DC = \frac{r_e}{\sin\left(\frac{180 - \varphi + \varphi_1^*}{2}\right)} \cdot \cos\left(90^\circ - \left(\beta + \varepsilon/2 + \varphi_1^*\right)\right).$$

В случае, если осевая подача фрезы оказывается менее величины $3r_e + 2DC$, точка H (вершина микрогребешка) оказывается не на режущей кромке СМП, а на ее радиусном участке. В этом случае порядок определения высоты микронеровности видоизменяется. Координаты точки C , являющейся центром окружности радиусом r_e в системе координат XAY , приблизительно равны:

$$\begin{cases} x_C = AD \cdot \cos \beta + DC \cdot \sin \beta \\ y_C = -(DC \cdot \cos \beta - AD \cdot \sin \beta) \end{cases}; \quad (3.39)$$

$$\text{где длина отрезка } AD \text{ определяется по формуле } AD = \frac{DC}{\operatorname{tg}(\beta + \varphi_1^* + \varepsilon/2)}.$$

Уравнение прямой, аппроксимирующей проекцию режущей кромки AB^* на плоскость XAY , записывается в виде:

$$\begin{cases} x_1(t) = t \cdot \cos(-\varphi_1^*) \\ y_1(t) = t \cdot \sin(-\varphi_1^*) \end{cases}; \quad (3.40)$$

Уравнение окружности радиусом r_e при вершине предыдущего зуба фрезы, прошедшего через плоскость формообразования:

$$\begin{cases} x_2(u) = (x_C + S_z) + r_e \cdot \cos u \\ y_2(u) = (y_C + S_z \operatorname{tg} \beta) + r_e \cdot \sin u \end{cases}; \quad (3.41)$$

Для определения координат пересечения прямой (3.40) и окружности (3.41) необходимо найти общее решение этих уравнений. С учетом трансцендентности исходных уравнений следует использовать для приближенного решения

численные методы (например, метод Ньютона-Рафсона) [35]. Начальные значения параметров t и u равны S_z и $\pi/2$, соответственно, приращение равно 0.001° . В результате решения получим пару значений, представляющих собой координаты x_H и y_H точки H пересечения проекции режущей кромки и углового радиуса, т.е. вершины микронеровности. Тогда высота остаточной микронеровности равно расстоянию от точки H до обрабатываемой поверхности:

$$h_{re}^* = \frac{|x_H \operatorname{tg} \beta - y_H|}{\sqrt{\operatorname{tg}^2 \beta + 1}} - (DC - r_e). \quad (3.42)$$

Если радиус r_e равен или превышает величину подачи на зуб S_z , то высоту микрогребешков h_{re} в осевой плоскости при фрезоточении можно рассчитать по формуле (3.43):

$$h_{re} = R_e - \sqrt{R_e^2 - \left(\frac{S_z}{2}\right)^2}; \quad (3.43)$$

Рассчитанные по формулам (3.38–3.43) значения сведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

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 , 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 – Ra, мкм)		

Для повышения качества поверхности при фрезоточении рекомендуется снижать S_z , увеличивать r_e , задавать положительный осевой γ , использовать фрезы с большим числом зубьев z , контролировать углы установки пластин и их биение, а также учитывать влияние угла наклона обрабатываемой поверхности. Дополнительно рекомендуется применять численные методы моделирования для

точного прогнозирования высоты остаточной микрогеометрии.

3.4.4 Определение кинематических задних углов и параметров срезаемого слоя сборных дисковых фрез с СМП при обработке фасонных деталей мобильных колесных платформ

Согласно ГОСТ 25762-83 [13], геометрические параметры режущего лезвия измеряются в кинематической системе координат относительно вектора результирующего движения резания, включающего главное движение резания и движение подачи. Кинематический задний угол на периферийной части фрезы всегда меньше или равен статическому. Возможна ситуация, когда при определенном сочетании режимных факторов и конструктивных параметров кинематический задний угол окажется меньше минимально допустимого значения (обычно 3–5°), что приведет к повышенному трению инструмента о заготовку и, как следствие, интенсивному износу инструмента. Поэтому на этапе проектирования режущего инструмента необходимо выполнить проверку достаточной величины кинематических задних углов [39].

Для моделирования процесса формообразования сборной дисковой фрезой поверхности колесной пары можно представить, что заготовка неподвижна, а фреза совершает относительно неё сложное движение, состоящее из главного движения и движения подачи. Тогда в проекции на радиальную плоскость заготовки траектория движения фрезы является удлиненной эпициклоидой. Поскольку за один оборот фреза проходит по дуге расстояние, равное подаче на оборот, для корректного математического описания движения необходимо ввести коэффициент масштабирования эпициклоиды («проскальзывания» окружности фрезы относительно окружности заготовки):

$$K = \frac{2\pi \cdot R_{\text{фр}}}{S_{\text{об}}}; \quad (3.44)$$

При обработке по рассматриваемой схеме оператором станка задается

частота вращения фрезы $n_{\text{фр}}$, частота вращения обрабатываемой заготовки (колесной пары) $n_{\text{заг}}$, продольная подача вдоль контура колесной пары. Линейная скорость заготовки фактически равна периферийной минутной подаче фрезы:

$$S_{\text{фр.мин}} = V_{\text{заг}} = \pi \cdot D_{\text{заг}} \cdot n_{\text{заг}}, [\text{мм/мин}] \quad (3.45)$$

где $D_{\text{заг}}$ и $n_{\text{заг}}$ – известные диаметр и частота вращения заготовки, соответственно. Отсюда при необходимости можно вычислить периферийную подачу на зуб:

$$S_{\text{зпер}} = \frac{S_{\text{фр.мин}}}{z \cdot n_{\text{фр}}}; \quad (3.46)$$

где z – число зубьев фрезы, $n_{\text{фр}}$ – частота вращения фрезы при известной скорости резания. Тогда обратная подача фрезы равна:

$$S_{\text{об}} = S_{\text{зпер}} \cdot z \quad (3.47)$$

Полученное значение можно подставить в выражение для K (3.44). В качестве альтернативного варианта при используемом наборе исходных данных можно для последующих расчетов вместо коэффициента K , учитывающего периферийную обратную подачу фрезы, использовать коэффициент K_n , равный отношению известных частот вращения фрезы и колесной пары:

$$K_n = \frac{n_{\text{фр}}}{n_{\text{заг}}} \quad (3.48)$$

Уравнение движения фрезы относительно заготовки для встречного фрезерования по схеме, показанной на рис 3.21, имеет вид:

$$\begin{cases} x(\vartheta) = (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \cos \vartheta - R_{\text{фр}} \cdot \cos(-\Theta) \\ y(\vartheta) = (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \sin \vartheta - R_{\text{фр}} \cdot \sin(-\Theta) \end{cases} \quad (3.49)$$

Для попутного фрезерования по схеме на рис. 3.22:

$$\begin{cases} x(\vartheta) = (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \cos \vartheta + R_{\text{фр}} \cdot \cos(\Theta) \\ y(\vartheta) = (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \sin \vartheta + R_{\text{фр}} \cdot \sin(\Theta) \end{cases} \quad (3.50)$$

где ϑ – угол (в градусах) поворота радиус-вектора, соединяющего начало координат O и центр фрезы C_1 (далее называемый главным радиус-вектором), r – радиус круговой траектории (т.е. радиус поверхности заготовки после обработки), Θ – угол поворота радиус-вектора фрезы, проведенного из центра фрезы к

В начальном положении фрезы ее радиус-вектор C_0A_0 расположен коллинеарно главному радиус-вектору OC_0 .

Самое неблагоприятное (наименьшее) значение кинематического заднего угла наблюдается при наибольшей толщине срезаемого слоя. При встречном фрезеровании это соответствует моменту выхода зуба фрезы из резания, а при попутном – моменту врезания зуба в заготовку. Следовательно, для расчета кинематического заднего угла требуется задать такой угол поворота ϑ_0 главного радиус-вектора, при котором зависимый от него угол поворота $\Theta_{\text{фр}}$ радиус-вектора фрезы в новом положении C_1A будет соответствовать моменту среза наибольшей толщины слоя материала. Для этого определим уравнение окружности обрабатываемой заготовки:

$$\begin{cases} x_{\text{окр}}(\tau) = (\rho + t) \cdot \cos \tau \\ y_{\text{окр}}(\tau) = (\rho + t) \cdot \sin \tau, \end{cases} \quad (3.52)$$

где t – глубина резания в радиальном направлении.

Найдем общее решение систем (3.43) либо (3.44) совместно с (3.46) на заданном небольшом интервале значений параметров ϑ и t . Фактически для этого требуется найти решение системы уравнений:

$$\begin{cases} x(\vartheta) = x_{\text{окр}}(\tau) \\ y(\vartheta) = y_{\text{окр}}(\tau) \end{cases} \quad (3.53)$$

С учетом трансцендентности исходных уравнений следует использовать для приближенного решения численные методы (например, метод Ньютона-Рафсона) [35]. Начальные значения параметров ϑ и τ равны 0, приращение равно 0.001° . В результате решения получим пару значений, из которых первое представляет собой искомый угол поворота ϑ_0 главного радиус-вектора, а второе – угол поворота μ радиус-вектора, соединяющего начало координат с точкой входа/выхода зуба фрезы.

Кинематический задний угол представляет собой угол между задней поверхностью СМП и касательной к траектории общей скорости движения, т.е. в данном случае к удлиненной эпитрохоиде. Таким образом, задача определения величины кинематического заднего угла сводится к нахождению значения

производной параметрически заданной функции (3.49) или (3.50) в точке, соответствующей моменту среза вершиной зуба фрезы слоя материала наибольшей толщины. Для встречного фрезерования такая производная имеет вид:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{\frac{dy}{d\vartheta}}{\frac{dx}{d\vartheta}} = \frac{\cos \vartheta (R_{\text{фр}} + \rho) + \rho K \cos\left(-\frac{\rho K}{R_{\text{фр}}}\vartheta\right)}{-\sin \vartheta (R_{\text{фр}} + \rho) - \rho K \sin\left(-\frac{\rho K}{R_{\text{фр}}}\vartheta\right)} \quad (3.54)$$

Для попутного фрезерования:

$$\left(\frac{dy}{dx}\right) = \frac{\frac{dy}{d\vartheta}}{\frac{dx}{d\vartheta}} = \frac{\cos \vartheta (R_{\text{фр}} + \rho) - \rho K \cos\left(\frac{\rho K}{R_{\text{фр}}}\vartheta\right)}{-\sin \vartheta (R_{\text{фр}} + \rho) - \rho K \sin\left(\frac{\rho K}{R_{\text{фр}}}\vartheta\right)} \quad (3.55)$$

Подставив в уравнения (3.54) и (3.55) значение ϑ_0 , получим угол наклона касательной к траектории движения зуба фрезы в искомой точке:

$$\eta = \operatorname{arctg} \frac{dy}{dx}. \quad (3.56)$$

Окончательно кинематический задний угол в искомой точке равен:

$$\alpha_{\text{кин}} = \alpha_{\text{ст}} \pm (90^\circ - \Theta_{\text{фр}} - \eta), \quad (3.57)$$

где знак «+» берется для встречного фрезерования, знак «-» для попутного.

Как видно из анализа уравнения (3.57), $\alpha_{\text{кин}}$ зависит от соотношения радиусов фрезы и заготовки, числа зубьев фрезы и величин подачи и глубины резания. В реальных условиях обработки, когда заготовка имеет сложный профиль (т.е. различные радиусы в разных точках), режущая пластина обладает переменной геометрией вдоль режущей кромки, а режимы резания варьируются, целесообразно вместо абсолютного значения кинематического заднего угла рассматривать разницу между статическим и кинематическим углами, равную:

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{ст}} - \alpha_{\text{кин}} = 90^\circ - \Theta_{\text{фр}} - \eta. \quad (3.58)$$

Кинематический задний угол всегда меньше или равен статическому.

Рассмотренная модель может использоваться не только для вычисления кинематических углов фрезы, но и для других целей – в частности, для оценки

величины сил резания, стойкости фрезы и пр. Известны расчетные методики [94], использующие при определении показателей процесса резания и износа режущего инструмента толщину и ширину срезаемого слоя и удельную нагрузку для известного обрабатываемого материала. Такие методики являются эмпирическими и дают некоторую погрешность, однако во многих случаях могут применяться с достаточной для практических задач точностью.

Для оценки работоспособности созданной конструкции сборной дисковой фрезы с использованием описанной выше методики были выполнены расчеты разницы $\Delta\alpha$ кинематического и статического заднего углов в радиальном сечении при условии параллельности режущей кромки оси фрезы с учетом направления фрезерования. Расчет проводился для обработки профиля колесной пары с диаметром круга катания 957 мм при различных величинах оборотных подач сборной дисковой фрезой с СМП диаметром 135 мм с 10 зубьями (табл. 3.7).

Таблица 3.7

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

Разница значений $\Delta\alpha$ для попутного и встречного фрезерования при данных ограничениях не превышает 5%. Разница диаметров обрабатываемого профиля колесной пары относительно номинального составляет +56 мм (+6%) для гребня и -15.85 мм (-3.4%) для крайней точки защитной фаски. При таких диаметрах разница в значениях $\Delta\alpha$ по сравнению с приведенными в табл. 3.6 наблюдается лишь в четвертом знаке после десятичной запятой.

Анализ полученных данных показывает, что при рассматриваемых конструктивных и эксплуатационных параметрах разница величин статического и кинематического задних углов не выходит за пределы допусков на угловые

размеры ($\pm 1^\circ$). Практически значимая разница указанных углов (более 1°) для выбранных параметров наблюдается при оборотной подаче около 2 мм/зуб (20 мм/об) и выше.

Соответствующим образом меняется и кинематический передний угол, однако зависимость обратная, т.е. кинематический передний угол больше статического. Передний угол в значительной мере влияет на силу резания, и колебания его величины могут вызвать вибрации, особенно при большом числе зубьев и высоких подачах.

Представленная модель может использоваться не только для вычисления кинематических углов, но и для определения величин, характеризующих срезаемый слой материала. Эти величины используются в дальнейшем для расчета силовых параметров, оценки износа и периода стойкости проектируемой сборной фрезы.

Рассмотрим порядок определения толщины срезаемого слоя с использованием имеющихся расчетных схем (рис. 3.21 и 3.22). Максимальная толщина срезаемого слоя (МТСС) равна длине отрезка AB , являющегося продолжением радиус-вектора фрезы C_1B , определяемого положением следующей СМП сборной дисковой фрезы, входящей в резание после текущей. Координаты точки A получаются подстановкой в систему уравнений (3.49) или (3.50) значения параметра ϑ , численно равного ϑ_0 . Координаты начальной точки C_1 радиус-вектора фрезы в системе координат заготовки XOY равны:

$$\begin{aligned} x_{C1} &= (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \cos \vartheta_0, \\ y_{C1} &= (R_{\text{фр}} + \rho) \cdot \sin \vartheta_0, \end{aligned} \quad (3.59)$$

где угол ϑ_0 главного радиус-вектора определяется в описанном выше порядке. Тогда уравнение прямой, содержащей отрезок C_1B , имеет вид:

$$\begin{cases} x_L(t) = x_{C1} + t \cdot \cos \Theta \\ y_L(t) = y_{C1} + t \cdot \sin \Theta \end{cases} \quad (3.60)$$

где угол Θ рассчитывается по выражению (3.44).

Точка пересечения прямой (3.60) и эпициклоиды (3.49) либо (3.50) определяется численным методом по вышеописанной методике при начальных

значениях $\vartheta = \frac{S_{об}}{\rho} + \vartheta_0$, $t = 0$. В результате решения получим координаты точки B . Тогда МТСС, равная длине отрезка AB , определяется как расстояние между двумя точками:

$$h_{max} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}. \quad (3.61)$$

Для оценки длины пути трения зуба о поверхность заготовки при встречном фрезеровании требуется рассчитать смещение фрезы H относительно начального положения за время контакта с заготовкой:

$$H = (R_{фр} + \rho) \cdot \sin \vartheta_0 \quad (3.62)$$

Дополнительный угол ϑ_ψ при встречном фрезеровании приближенно равен:

$$\vartheta_\psi = \arcsin \frac{H}{R_{фр}}. \quad (3.63)$$

Угол контакта СМП с заготовкой для встречного фрезерования приблизительно равен:

$$\psi = \Theta_{фр} + \vartheta_\psi. \quad (3.64)$$

Для попутного фрезерования:

$$\psi = 180^\circ - \Theta_{фр}. \quad (3.65)$$

Действительная величина угла контакта несколько больше расчетной (примерно на 1–10 % в зависимости от соотношения диаметров заготовки и фрезы, глубины резания и периферийной подачи).

При фрезоточении длина кривой контакта B_k , равная длине дуги трохойды, заключенной между точками A_0 и A , эквивалентна ширине фрезерования при традиционной фрезерной обработке. Для упрощения расчетов длина участка трохойды может быть заменена дугой окружности радиусом $R_{фр}$. Тогда приближенное значение B_k может быть рассчитано по формуле:

$$B_k = \frac{\pi \cdot R_{фр} \cdot \psi}{180^\circ}. \quad (3.66)$$

Полученные значения можно использовать при оценке стойкости сборной фрезы с СМП по известным методикам, например, по расширенной модели Тейлора:

$$T = \left(\frac{CT \cdot V \cdot B^n}{V \cdot h^p \cdot b^q} \right)^{1/m}, \quad (3.67)$$

где VB – ширина фаски износа (критерий притупления), h – толщина стружки, определяемая по выражению (3.61), b – ширина срезаемого слоя, в рассматриваемом случае равная B_k , V – скорость резания, CT , n , q , p , m – коэффициенты, определяемые по справочным данным или опытным путем.

Существуют различные методы расчета сил резания, крутящего момента на шпинделе станка и мощности резания. Многие фирмы-производители режущих инструментов используют методику расчета через удельную силу, согласно которой главная (тангенциальная) составляющая силы резания равна [29]:

$$F_Z = b \cdot h \cdot K_C \cdot K_F = b \cdot h^{1-m} \cdot k_{c1.1} \cdot K_F, \quad (3.68)$$

где b – ширина срезаемого слоя, равная B_k ; K_C – удельная сила резания; K_F – поправочный коэффициент, определяемый эмпирически; m – показатель степени; $k_{c1.1}$ – удельная сила, приходящаяся на площадь среза, равную 1 мм^2 . Значения удельной силы и показателя степени для различных групп обрабатываемости (по ISO 513) в справочной литературе.

В табл. 3.8 и 3.9 приводятся рассчитанные по приведенной выше методике значения МТСС h_{\max} , угла контакта ψ и длины дуги контакта B_k для различных режимов фрезоточения колесной пары диаметром 957 мм сборной дисковой фрезой диаметров 135 мм, имеющей 10 зубьев.

На рис. 3.23 представлен график изменения максимальной толщины срезаемого слоя в зависимости от глубины резания и оборотной подачи при встречном и попутном фрезоточении.

Таблица 3.8

Параметры срезаемого слоя при встречном фрезеровании.

t, мм	$S_{об} = 0.5 \text{ мм}$			$S_{об} = 1.0 \text{ мм}$			$S_{об} = 3.5 \text{ мм}$			$S_{об} = 10.0 \text{ мм}$		
	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

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 _к , мм	h _{max} , мм	ψ, °	B _к , мм	h _{max} , мм	ψ, °	B _к , мм	h _{max} , мм	ψ, °	B _к , 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

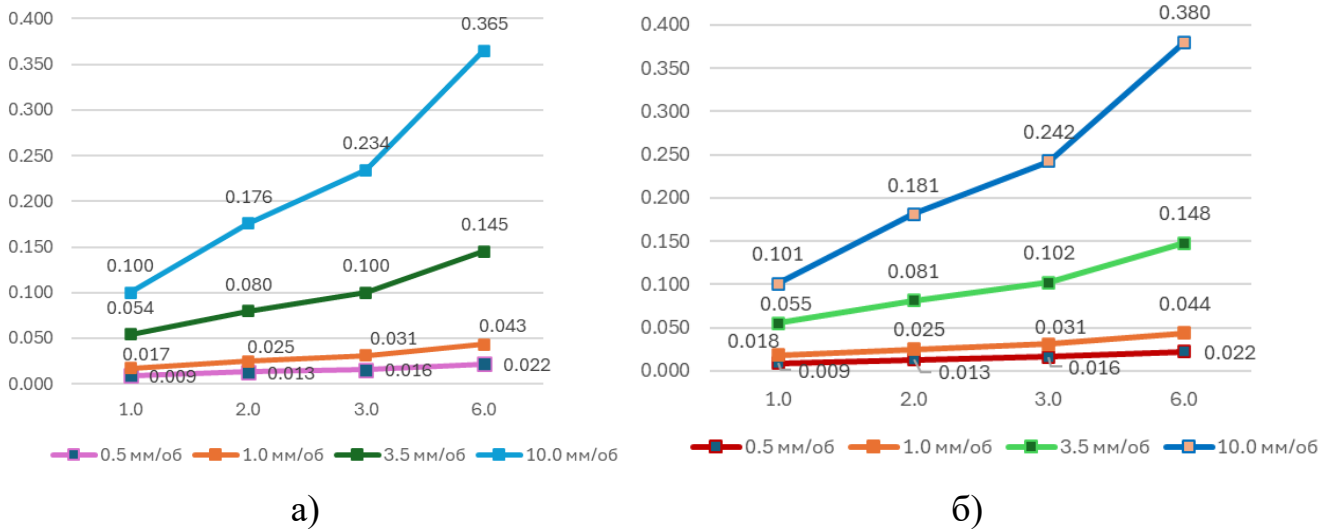


Рис. 3.23 – Изменение максимальной толщины срезаемого слоя в зависимости от глубины резания и оборотной подачи: а) при встречном фрезоточении; б) при попутном фрезоточении.

3.5. Выводы по главе 3

1. Разработанная блок-схема алгоритма системы автоматизированного проектирования сборных фасонных фрез с СМП обеспечивает выбор конструктивных параметров на основе исходных данных. При проектировании фрезы с ножами определены следующие параметры: диаметр $D = 250$ мм, количество ножей $Z = 10$ шт., угол наклона ножей $\omega = 15^\circ$, общее количество СМП $n = 130$ шт., диаметр СМП $d = 12$ мм.

2. Методика определения положения СМП в корпусе сборной фасонной фрезы включает расчеты углов резания, таких как передний, задний, главный и

вспомогательный угол в плане, а также их преобразование в пространственные координаты посредством системы поворотов вокруг трех осей.

3. Равномерность фрезерования сборными фасонными фрезами обеспечивается при условии нахождения в зоне резания не менее двух пластин одновременно. При глубине резания $t = 3$ мм наибольшая толщина среза составила $\Delta_6 = 2.75$ мм, наименьшая – $\Delta_1 = 0.315$ мм, что подтверждает неравномерность нагрузки по участкам профиля, особенно на выпуклых и вогнутых участках.

4. В качестве режущих элементов сборной дисковой фрезы с СМП для упрощения настройки выбраны тангенциальные пластины LNHU 1306 и радиальные HM90 ADKT 1505PDR.

5. Теоретический анализ формирования остаточной микрогеометрии при фрезоточении показал, что при радиусе вершины $r_e = 0.8$ мм и подаче $S_z = 0.5$ мм/зуб, высота остаточной микронеровности h в осевой плоскости составила 0.031 мм ($R_a = 7.81$ мкм), что существенно ниже, чем при традиционном точении ($R_a = 9$ мкм).

6. Расчет кинематических задних углов и параметров срезаемого слоя при фрезоточении профиля колесной пары осуществляемом по эпициклоидальной траектории установил, что при глубине резания 2 мм и оборотной подаче до 10 мм/об разница между статическим и кинематическим задним углом не превышает 0.9° , что исключает риск затирания задней поверхности. Полученные значения подтверждают применимость разработанной модели для проектирования и настройки режимов фрезерования фасонных деталей.

7. Проведенный расчет максимальной толщины срезаемого слоя (h_{\max}) по параметрически заданной функции движения зубьев сборной дисковой фрезы показал нелинейный характер ее изменения: с увеличением глубины резания и оборотной подачи наблюдается рост толщины. Согласно расчетам, для диапазона глубин резания 1–6 мм и оборотных подач 0.5–10 мм/об максимальная толщина срезаемого слоя h_{\max} изменяется при встречном фрезеровании в пределах 0.009–0.365 мм, а при попутном 0.009–0.38 мм. Полученные данные могут быть использованы для расчета сил резания, оценки износа и стойкости фрезы.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СБОРНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

4.1. Способ обработки колесных пар с использованием сборной фрезы

Принцип работы сборных дисковых фрез с СМП основан на послойном снятии материала с обрабатываемой поверхности за счет резания, аналогичного процессу обработки токарным резцом с СМП. При этом вращение фрезы обеспечивает последовательный вход в зону резания нескольких режущих пластин, равномерное распределение нагрузок между ними и повышение производительности обработки (рис. 4.1).

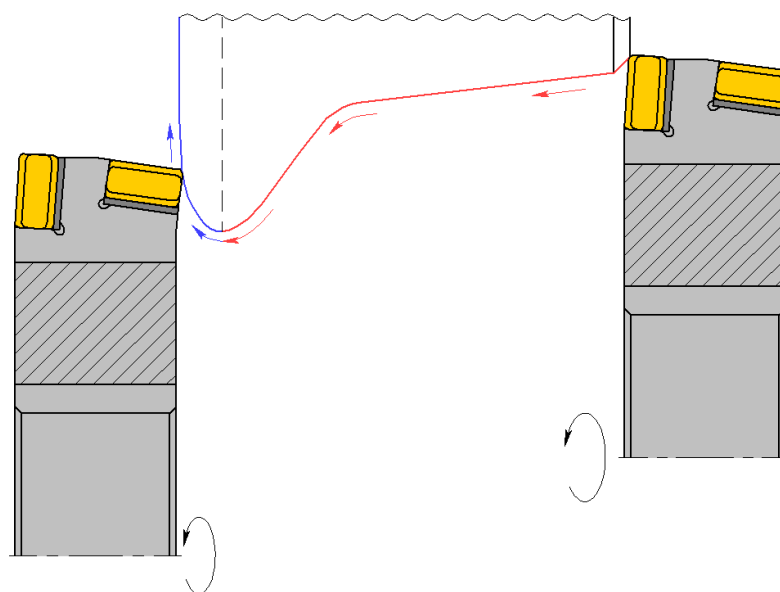


Рис. 4.1 – Способ обработки профиля катания колесных пар с помощью дисковой фрезы с СМП.

Конструкция корпуса дисковой фрезы с СМП и применение станка с ЧПУ, позволяет обрабатывать одной фрезой различные фасонные детали мобильных колесных платформ, например обработка профилей катания колесных пар железнодорожных составов или машиностроительных кранов. Дисковая фреза с СМП выполнена в двух исполнениях – правое и левое. За счет этого достигается возможность обработки левого и правого бандажа колесной пары одновременно.

Для обработки профиля колесной пары с использованием дисковой фрезы с СМП был разработан G-код, адаптированный для станков с ЧПУ.

4.2. Комбинированный способ обработки профиля катания колесных пар

На основе проведенного анализа был разработан новый комбинированный способ восстановления профиля изношенных поверхностей катания колес мобильных колесных платформ в машиностроении [44], по которому зарегистрирован патент на изобретение [79].

Комбинированный способ обработки заключается в том, что предварительный нагрев поверхности катания осуществляется посредством чернового шлифования всей поверхности катания, после чего выполняется ее механическая обработка – обточка или фрезерование. При этом черновое шлифование и механическая обработка могут выполняться как последовательно, так и параллельно (рис. 4.2).

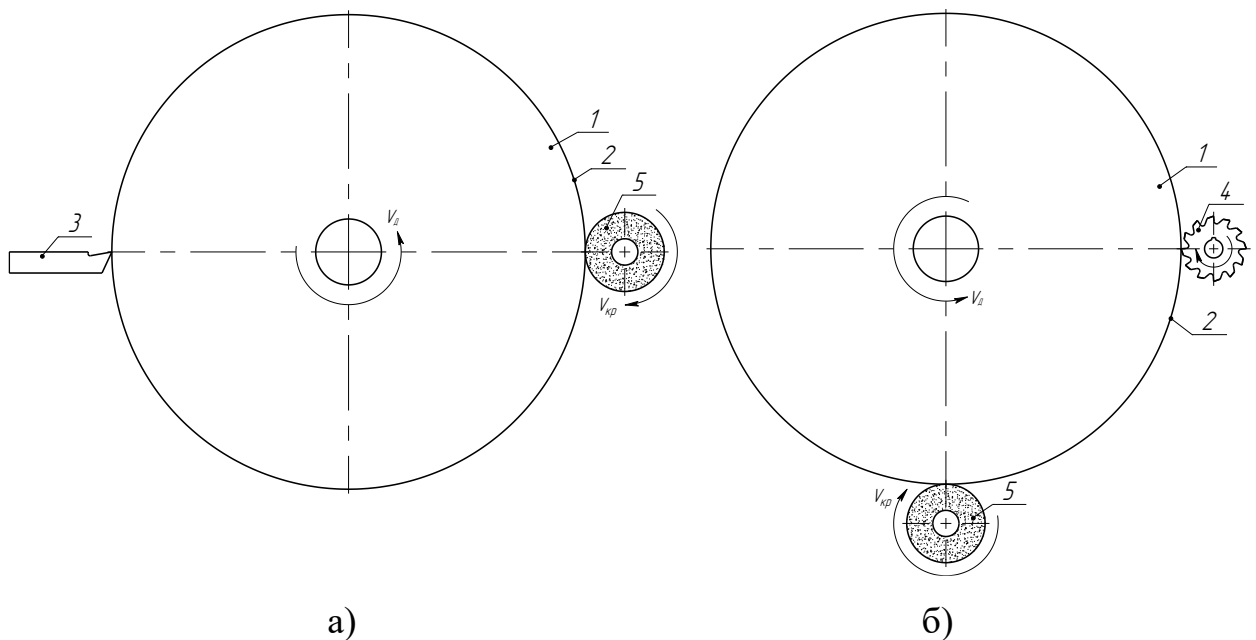


Рис. 4.2 – Комбинированный способ обработки: обточкой (а), фрезерованием (б).

Колесная пара – 1; обрабатываемая поверхность – 2; резец – 3; фреза – 4; шлифовальный круг – 5; направление вращения колесной пары – V_d ; направление вращения шлифовального круга – $V_{кр}$.

Черновое шлифование осуществляется при следующих режимах:

- скорость вращения шлифовального круга $V_{кр} = 30...35$ м/с;
- поперечная подача $S_p = 0.01...0.05$ мм/об;
- глубина резания $t = 1...11.8$ мм,
- скорость вращения детали $V_d = 10...50$ м/мин.

В процессе чернового шлифования температура в зоне контакта достигает $550...850^\circ\text{C}$, а на глубине минимального снимаемого припуска $t_{\min} = 0.2$ мм – $300...600^\circ\text{C}$. Такие температурные условия инициируют фазовые превращения в материале и способствуют формированию в поверхностном слое структуры перлита и сорбита. Формирование перлитно-сорбитной структуры стабилизирует физико-механические свойства материала, облегчает последующую механическую обработку и повышает долговечность восстановленной поверхности катания.

Основная цель параллельного выполнения чернового шлифования и механической обработки состоит в том, чтобы черновое шлифование обеспечивало нагрев и предварительное выравнивание поверхности, а обточка или фрезерование – окончательное формирование требуемой геометрии и качества профиля катания. Совмещение процессов позволяет сократить общее время восстановления, повысить производительность обработки и одновременно снизить нагрузку на режущий инструмент.

В качестве инструмента для механической обработки при комбинированном способе может использоваться как разработанная в рамках настоящего исследования дисковая фреза с СМП [58, 64], так и сборная фасонная фреза с СМП, параметры которой приведены в табл. 3.4. Это обеспечивает гибкость применения метода в зависимости от доступного оборудования, требуемой точности обработки и специфики формы профиля катания.

Реализация комбинированного способа обработки обеспечивает повышение стойкости режущего инструмента за счет предварительной стабилизации структуры материала, снижение количества брака и улучшение эксплуатационных характеристик колесных пар за счет исключения перегрева и деформаций в процессе восстановления их профиля катания.

4.3. Описание технологической системы для обработки фасонных деталей с использованием сборной дисковой фрезы

В целях повышения эффективности механической обработки колесных пар в условиях ремонтного производства предлагается интеграция мотор-шпинделя в конструкцию существующих токарных станков с ЧПУ путем модернизации суппорта и замены направляющих скольжения на направляющие качения [50].

В отличие от традиционной токарной обработки, применение дисковой фрезы с СМП обеспечивает возможность формирования профиля за меньшее количество рабочих проходов, с одновременным уменьшением объема снимаемого металла при износе, а также повышает стойкость режущего инструмента за счет равномерного распределения нагрузки между несколькими режущими пластинами.

Для обеспечения работоспособности системы на стадии проектирования была проведена серия предварительных расчетов режимов фрезерования [87] с целью определения необходимых кинематических и силовых характеристик мотор-шпинделя. Исходные данные:

- Диаметр фрезы: $D = 135$ мм;
- Число зубьев фрезы: $z = 10$ шт;
- Подача на оборот заготовки продольная: $S_z = 0.9$ мм/зуб;
- Подача на зуб периферийная $S_z = 0.35$ мм/зуб
- Диаметр обрабатываемой детали: $D_{\text{заг}} = 957$ мм;
- Ширина колеса: $B = 130$ мм (рис. 4.3);
- Глубина фрезерования: $t = 1 \dots 2$ мм;
- Материал колесная сталь 2;
- Предел прочности колесной стали 2: $\sigma_B = 910$ МПа.

В табл. 4.1 представлены рассчитанные режимы резания для дисковой фрезы с СМП при глубине резания в диапазоне $t = 1 \dots 2$ мм.

Формула для основного (машинного) времени при фрезоточении:

$$T_M = \frac{L_1 + L_2}{S_{\text{м.прод}}}; \quad (4.1)$$

где L_1 – длина резания до вершины гребня: $L_1 = 114$ мм; L_2 – длина резания от вершины гребня: $L_2 = 17$ мм.

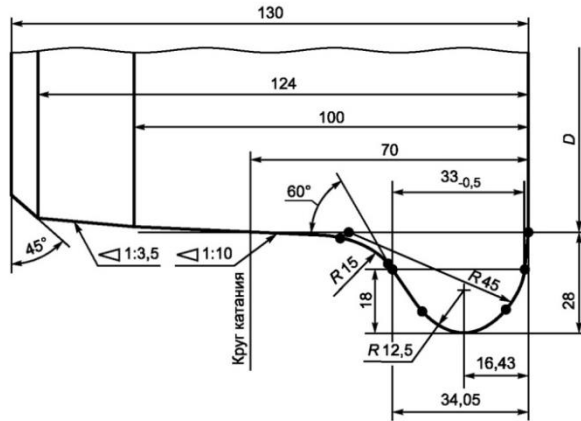


Рис. 4.3 – Определение ширины фрезерования колесной пары.

Таблица 4.1

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

Результаты демонстрируют зависимость технологических параметров (скорости резания V, частоты вращения n, минутной подачи S_м, силы резания P_z,

крутящего момента $M_{кр}$, мощности резания N_e и машинного времени обработки T_m) от изменения глубины резания.

На основе проведенных расчетов был подобран встраиваемый мотор, характеристики которого приведены в табл. 4.2. На рис. 4.4 представлен вариант технологического решения конструкции мотор-шпинделя в качестве примера.

Таблица 4.2

Характеристики выбранного встраиваемого мотора.

Тип электродвигателя	DD1270-220-063C
Номинальный крутящий момент, Н*м	570
Номинальная скорость вращения, об/мин	700
Номинальная мощность, кВт	41.8
Номинальный ток, А	100.4
Максимальный крутящий момент, Н*м	1046
Максимальный ток, А	240
Максимальная скорость вращения, об/мин	3 000
Масса, кг	6.3

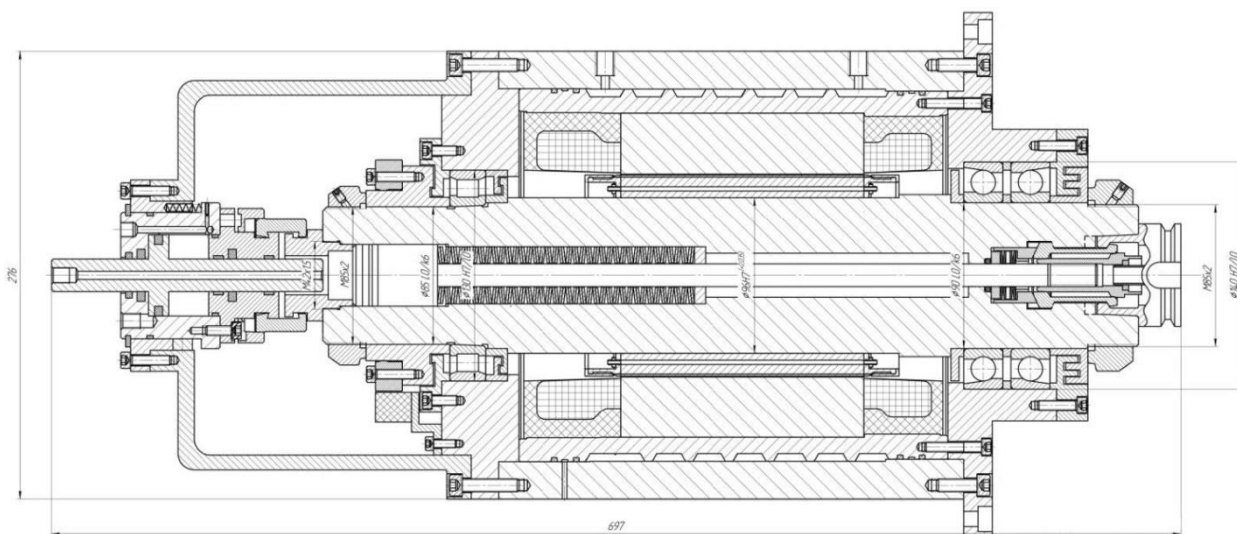


Рис. 4.4 – Чертеж конструкции мотор-шпинделя.

4.4. Выводы по главе 4

1. Разработанный способ фрезерования профиля катания колесных пар с применением сборной дисковой фрезы с СМП, обеспечивает послойное снятие материала при равномерном распределении нагрузок между режущими

пластинами. Конструкция инструмента с левым и правым исполнением позволяет одновременно обрабатывать оба бандажа колесной пары без переналадки, что повышает точность обработки фасонных деталей мобильных колесных платформ.

2. Комбинированный способ восстановления профиля катания колес, включает черновое шлифование с последующей или параллельной механической обработкой (фрезерованием или обточкой), при котором температурное воздействие (550–850 °С на поверхности и 300–600 °С на глубине припуска) формирует перлитно-сорбитную структуру в поверхностном слое. Это обеспечивает стабилизацию структуры материала, снижение нагрузок на режущий инструмент и повышение его стойкости.

3. Технологическое решение по дооснащению токарных станков с ЧПУ фрезерным мотор-шпинделем, обеспечивает возможность фрезерования профиля катания колесных пар в условиях ремонтного производства.

ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СБОРНОЙ ФРЕЗЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФАСОННЫХ ДЕТАЛЕЙ

5.1. Постановка задачи исследования по обработке профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ

С целью повышения эффективности восстановления профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ в условиях ремонтного производства, а также обеспечения стабильного качества обработки и снижения износа режущего инструмента, в рамках настоящего исследования поставлена задача экспериментальной проверки работоспособности и технологической эффективности разработанной сборной дисковой фрезы с СМП.

Основное внимание уделяется установлению зависимости между параметрами резания и такими показателями, как точность профиля, шероховатость поверхности, время обработки и износ режущих пластин. Также предусматривается сравнение полученных результатов с показателями традиционного точения колесных пар.

5.2. Планирование эксперимента по обработке профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ

Цель: Получение экспериментальных данных по фрезерованию профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ с применением разработанной сборной дисковой фрезой с СМП на заготовках из различных материалов.

Обработка проводилась на трехкоординатном фрезерном станке с ЧПУ модели DEED VMC-60C, технологические характеристики которого

обеспечивают условия, максимально приближенные к промышленной практике восстановления профиля катания колесных пар (рис. 5.1). Режимы резания подбирались индивидуально для каждого случая, исходя из параметров заготовки и особенностей конструкции режущей части дисковой фрезы с СМП. Выбор параметров был направлен на обеспечение стабильной обработки и допустимого износа инструмента. Всего было проведено шесть серий опытных обработок, классифицированных по двум признакам:

- материал заготовки (сталь 40Х и 35ХГСН);
- тип установленных режущих пластин (тангенциальные или радиальные).



Рис. 5.1 – Дисковая фреза с СМП установленная на шпинделе станка.

В табл. 5.1 представлены параметры резания и значения нагрузок по шпинделю станка, зафиксированные в ходе проведения экспериментов. Измерения производились по всей ширине профиля катания, включая гребень. Форма и размеры обрабатываемой заготовки, крепление, схема обработки были идентичны для всех опытов. Все обработки выполнялись на одном и том же оборудовании в контролируемых условиях.

Приведенные в таблице данные получены для условий встречного фрезерования, являющегося наиболее неблагоприятным с точки зрения силовых нагрузок. При переходе к попутному фрезерованию величины сил резания снижаются в среднем на 3–7%.

Параметры резания и значения нагрузок по шпинделю 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	LNHU 1306	ADKT 1505	LNHU 1306	ADKT 1505	LNHU 1306	ADKT 1505
t, мм	1.5					
V, м/мин	280	280	220	220	180	180
S _z , мм/зуб	2.5	1	2.5	1	2.5	1
n, об/мин	660	660	520	520	425	425
S _{м.прод} , мм/мин	4.79	1.92	3.78	1.51	3.09	1.24
P _s , Н	7978.8	5840	7993.2	5930.6	7760.6	5836.7
M _{крс} , Н*М	538.6	394.2	539.5	400.3	523.8	394
N _{es} , кВт	36.5	26.7	28.7	21.3	22.8	17.2

Полученные экспериментальные данные представляют основу для анализа влияния материала и типа пластин на качество обработки и износ инструмента, а также для последующего сравнения с параметрами точения колесных пар мобильных колесных платформ, выполняемого в производственных условиях.

5.3. Анализ полученных экспериментальных данных по фрезерованию профиля катания колесных пар мобильных колесных платформ

5.3.1. Анализ силовых и энергетических характеристик процесса фрезерования катания колесных пар мобильных колесных платформ

Экспериментальные данные, полученные в ходе проведенных опытов, позволили провести сравнительный анализ влияния материала заготовки, типа СМП (тангенциальные LNHU 1306 и радиальные ADKT 1505), а также параметров резания на технологические характеристики процесса фрезерования профиля катания колесных пар. Все обработки выполнялись в идентичных условиях: использовалась одна и та же дисковая фреза с СМП, заготовки имели одинаковую геометрию и способ крепления, а режимы резания подбирались

индивидуально только с учетом типа установленной пластины. Для обеспечения стабильности процесса и снижения износа инструмента при использовании радиальных пластин подача на зуб была снижена на 0.02-0.03 мм/зуб по сравнению с тангенциальными.

Экспериментальные данные по силе резания P_s , зафиксированные при фрезеровании заготовок из сталей 40X с твердостью 20 HRC (≈ 230 HB) и 45 HRC (≈ 423 HB), а также 35XГСН (57 HRC ≈ 620 HB), показывает, что сила резания не всегда увеличивается с ростом твердости материала. Наибольшее значение P_s (1500 Н) зафиксировано при обработке менее твердой стали 40X (230 HB) с тангенциальными пластинами LNHU 1306, что связано с высокой подачей и конструктивной геометрией пластины. Минимальные значения наблюдаются при использовании радиальных пластин ADKT 1505 и сниженной подаче. Таким образом, на силу резания влияет не только твердость материала, но и тип СМП, подача на зуб и режимы резания.

С увеличением твердости материала наблюдается рост энергозатрат N_{es} процесса, независимо от типа используемой пластины.

Аналогично предыдущим показателям, увеличение твердости обрабатываемого материала приводит к росту крутящего момента, необходимого для поддержания стабильного резания. Наиболее высокие значения $M_{крс}$ регистрируются при использовании пластин LNHU 1306, что объясняется сочетанием повышенной подачи и конструктивной геометрии режущей кромки, обеспечивающей глубокое и интенсивное резание.

5.3.2. Анализ шероховатости поверхности обработанной колесной пары

После проведения фрезерования поверхности катания колесной пары с использованием разработанной дисковой фрезы с СМП была выполнена количественная оценка параметров шероховатости поверхности. Измерения проводились на координатно-профилографической системе Optacom VC-10-UL,

оснащенной датчиком измерения шероховатости и специализированным программным обеспечением (рис. 5.2).



Рис. 5.2 – Измерение шероховатости.

Для анализа были выбраны прямолинейные зоны профиля по которой определяется диаметр колесной пары и в основном эксплуатируется. В каждой из прямолинейных зон проведены измерения шероховатости (рис. 5.3). Полученные значения параметров шероховатости приведены в табл. 5.2.

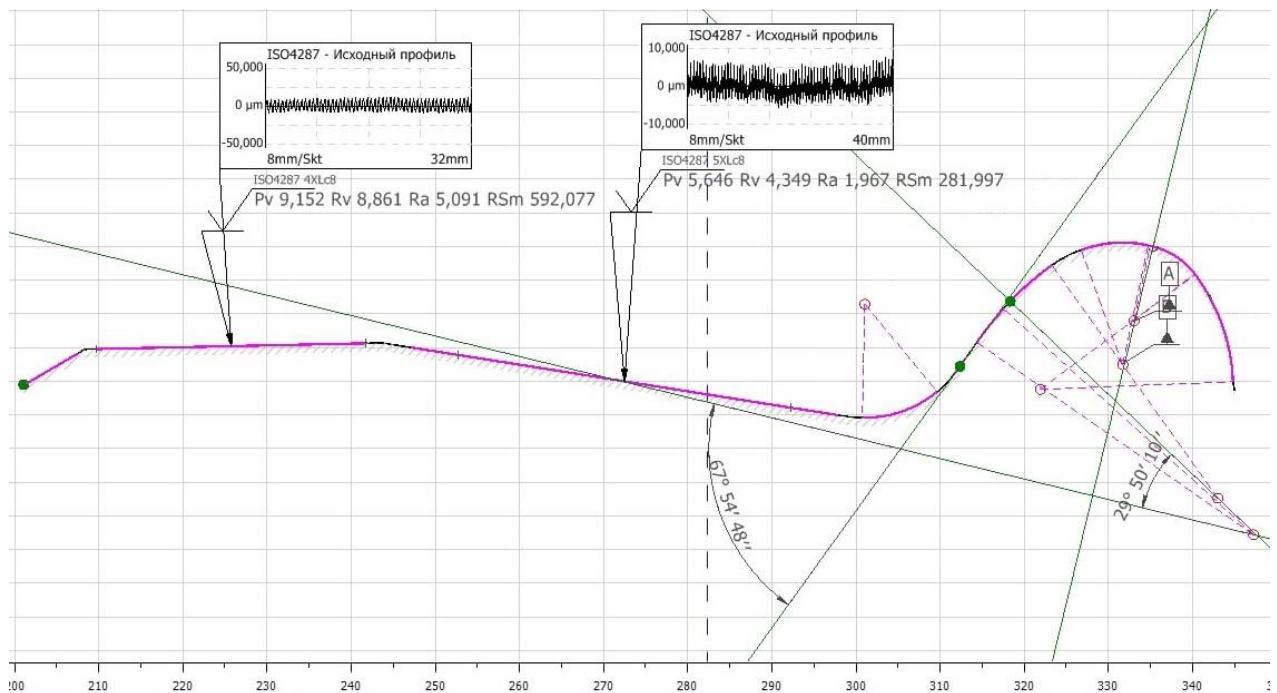


Рис. 5.3 – Шероховатость обработанной поверхности катания колесной пары.

Полученные значения параметров шероховатости.

Зона	Поперек направления фрезерования
Конусная 1:3.5	Ra = 1.967 мкм
Конусная 1:10	Ra = 5.091 мкм

Согласно нормативным требованиям ГОСТ 11018-2011 [10], допустимое значение шероховатости поверхности катания колесных пар составляет:

- $Ra \leq 10$ мкм при скорости движения до 200 км/ч,
- $Ra \leq 6.3$ мкм при скорости от 200 км/ч и выше.

Анализ полученных значений показывает, что параметр шероховатости Ra не превышает установленных нормативов, что подтверждает эффективность применения разработанной технологии фрезерования при обеспечении требуемого качества поверхности катания колесных пар мобильных колесных платформ.

5.4. Сравнительный анализ результатов фрезерования сборной дисковой фрезой и токарной обработки профиля катания колесных пар

С целью объективной оценки технологической эффективности разработанной дисковой фрезы с СМП был выполнен сравнительный анализ с традиционной токарной обработкой профиля катания колесных пар. В качестве базы для сравнения использовались сведения, предоставленные двумя крупными промышленными предприятиями: Демиховским машиностроительным заводом (ДМЗ) и Тверским вагоностроительным заводом (ТВЗ) [П.2].

На основании обобщенных данных была составлена сводная таблица (табл. 5.3), в которой приведены режимы резания и машинное время при точении профиля катания колесных пар, а также данные по фрезерованию, полученные в экспериментальных условиях.

Из таблицы видно, что машинное время при использовании дисковой фрезы

с СМП составляет 32.67 мин., что на 8.42 мин. больше, чем при токарной обработке на предприятии ТВЗ и на 0.9 мин. меньше, чем при токарной обработке на ДМЗ. Производительность обработки достигается благодаря повышению стойкости режущего инструмента за счет его конструктивных особенностей и используемой схемы обработки.

Таблица 5.3

Сравнение параметров токарной и фрезерной обработки колесных пар.

Предприятие	ДМЗ		ТВЗ		Фрезерование ДФ	
Диаметр колеса D, мм	1100	1060	1010	1009	957	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	1.5	1.5
Кол-во проходов i	2	2	1	1	1	1
Подача продольная S, мм/мин	14.5	18	15.5	18	4.79	1.92
Частота вращения колеса n, об/мин	12.8	12.8	11	18	660	660
Скорость резания V, м/мин	44.6	42.6	35	57	280	280
Основное (машинное) время T _м , мин	33.58		24.25		32.67	
Шероховатость обработанной поверхности Ra, 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	Не более 5		Не более 5		6 и более	
Фактическая величина износа по задней поверхности, мм	0.73		0.7		0.78	1.25
Фактическая стойкость режущего инструмента, мин	177.5		122.5		196	

Измерения шероховатости после фрезерования показали, что значения параметра Ra по всей ширине профиля, включая гребень, находятся в диапазоне 2-5.1 мкм, что соответствует нормативным требованиям ГОСТ 11018-2011 [10]. Согласно данным производственных организаций, при токарной обработке достигается шероховатость Ra в пределах 8-10 мкм. На рис. 5.4 показаны примеры обработанных поверхностей после фрезерования дисковой фрезой с СМП и точения резцом с СМП.

Дополнительно стоит отметить, что при фрезеровании сокращаются усилия на переналадку оборудования, что особенно актуально для условий серийного и ремонтного производства.

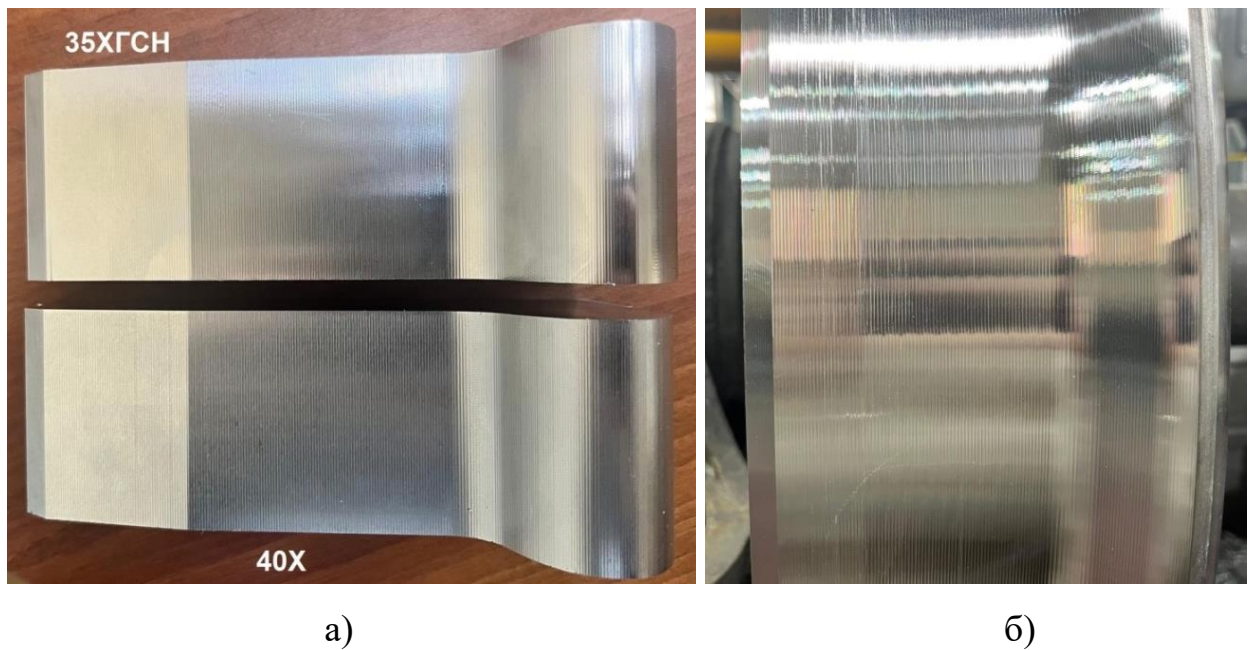


Рис. 5.4 – Обработанные поверхности колесных пар: фрезерование дисковой фрезой с СМП (а), точение резцом с СМП (б).

5.5. Сравнительная оценка стойкости и общей эффективности применения тангенциальных и радиальных пластин

Одной из задач при проектировании сборной дисковой фрезы с СМП являлась экспериментальная проверка эффективности применения двух различных типов режущих пластин – тангенциальных LNНУ 1306 и радиальных АДКТ 1505 – для фрезерования фасонных деталей мобильных колесных платформ. Проведенные исследования позволили комплексно оценить силовые и энергетические характеристики процесса, величину износа, стойкость инструмента и качество обработанной поверхности.

По результатам проведенных экспериментов установлено, что радиальные пластины АДКТ 1505 демонстрируют недостаточную надежность при обработке сложного профиля. После шести опытных обработок на задней поверхности радиальных пластин были зафиксированы сколы и критический износ до 1.25 мм (рис. 5.5), что превышает допустимую предельную величину износа по задней поверхности 1–1.2 мм. Это свидетельствует о сниженной стойкости при

фрезеровании профиля катания колесных пар, особенно в зоне изменения геометрии.

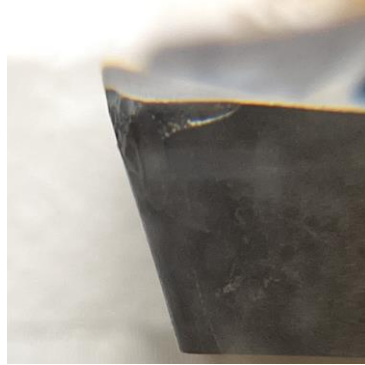


Рис. 5.5 – Износ по задней поверхности радиальных пластин ADKT 1505.

В то же время при использовании тангенциальных пластин LNНU 1306 износ носил равномерный характер по задней поверхности без сколов и трещин составил 0.78 мм (рис. 5.6), что находится в пределах допустимых норм и подтверждает их более высокую устойчивость к нагрузкам, возникающим при обработке фасонных поверхностей. Благодаря особенностям геометрии и более надежному боковому креплению, тангенциальные пластины обеспечили не только повышенную стойкость, но и лучшее распределение усилий, что снижает вероятность сколов и разрушений.



Рис. 5.6 – Износ по задней поверхности тангенциальных пластин LNНU 1306.

Экспериментально обосновано предпочтительное применение тангенциальных пластин LNНU 1306 при восстановлении профиля катания колесных пар и аналогичных фасонных деталей мобильных колесных платформ. На основе проведенного анализа была разработана конструкция сборной дисковой фрезы с СМП (рис. 5.7), ориентированная на использование тангенциальных СМП, в которой реализованы все проектные и технологические

решения, направленные на повышение стойкости инструмента при работе в сложных условиях. На рис. 5.8 представлен сборочный чертеж конструкции сборной дисковой фрезы с СМП, модифицированной с учетом полученных экспериментальных данных.

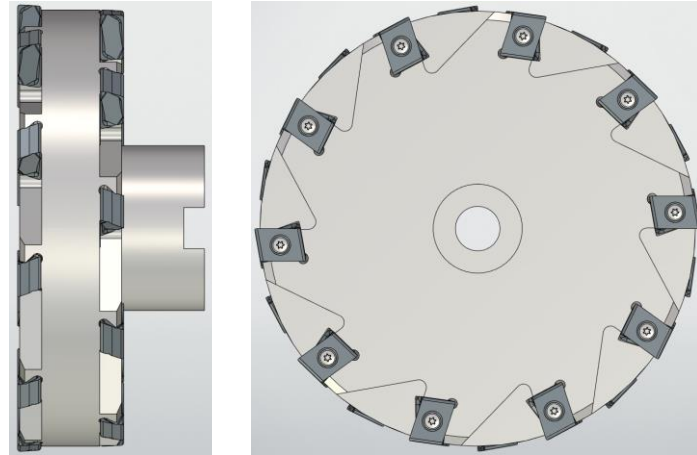


Рис. 5.7 – Модифицированная по результатам испытаний конструкция сборной дисковой фрезы с СМП.

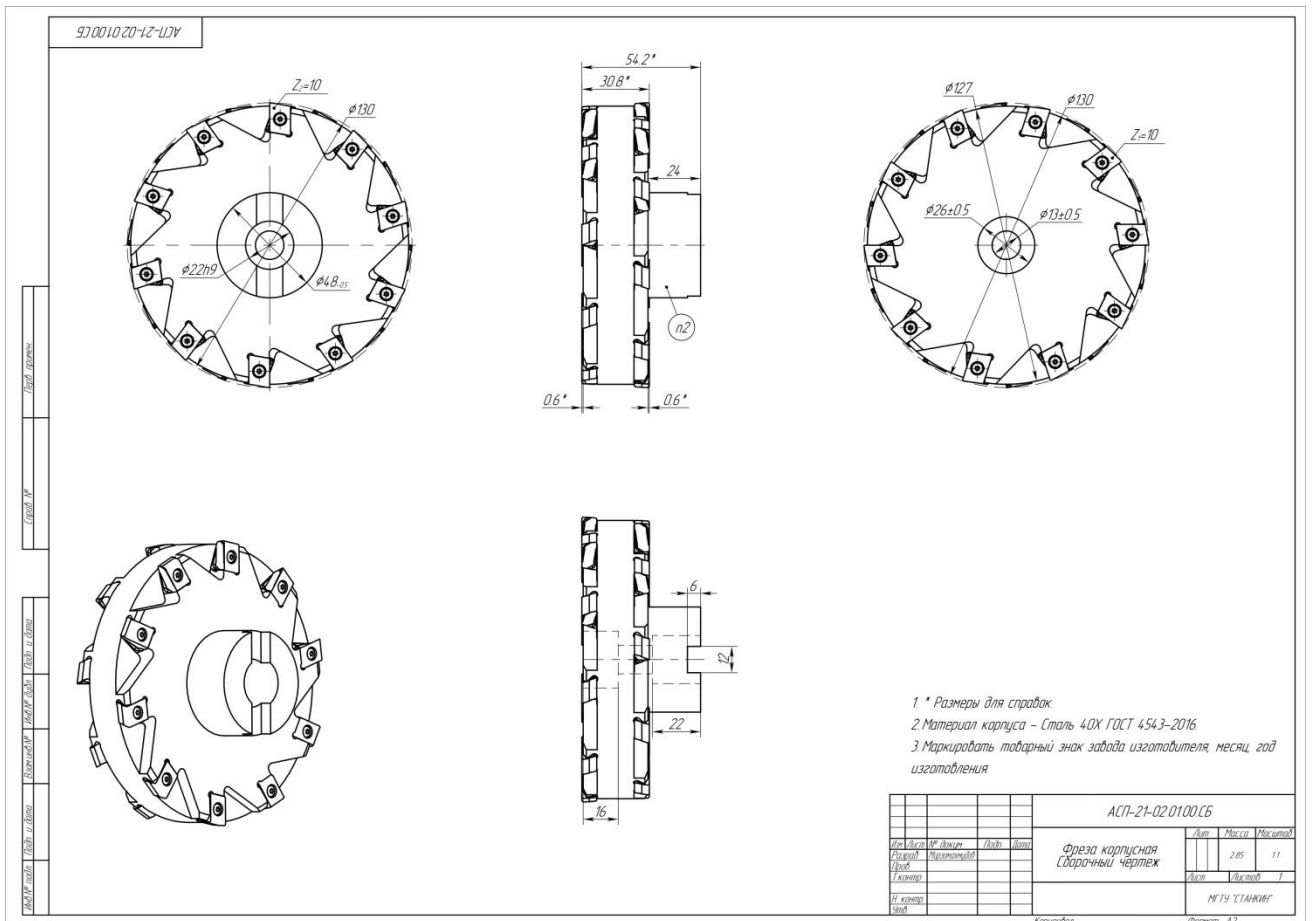


Рис. 5.8 – Сборочный чертеж модифицированной по результатам испытаний конструкции сборной дисковой фрезы с СМП.

5.6. Выводы по главе 5

1. На основании экспериментальных исследований выявлены влияния параметров резания, материала заготовки (сталь 40Х и 35ХГСН) и типа режущих пластин (LNНУ 1306 и АДКТ 1505) на силовые и энергетические характеристики процесса. При применении радиальных пластин АДКТ 1505 и сниженной подаче (1 мм/зуб) зафиксировано относительное снижение силовых нагрузок и энергопотребления по сравнению с тангенциальными пластинами. Однако, несмотря на это, стойкость радиальных пластин оказалась ниже, что обусловлено их меньшей нагрузочной способностью при фрезеровании сложных профилей.

2. В результате сравнения с токарной обработкой установлено, что машинное время при фрезеровании составляет 32.67 мин. (на уровне токарной обработки), а стойкость инструмента достигает 196 мин., что превышает показатели точения (до 177.5 мин.), а фактический износ по задней поверхности составляет 0.78 и 1.25 мм против 0.73 и 0.7 мм у токарного резца. При этом предельная величина износа по задней поверхности составляет 1–1.2 мм при фрезеровании и 0.6–0.8 мм при точении.

3. Сравнительный анализ результатов точения и фрезерования профиля катания колесных пар показал, что применение сборной дисковой фрезы с СМП позволяет добиться снижения износа по задней поверхности и увеличения стойкости режущего инструмента без ухудшения параметров качества обработки.

4. Шероховатость при фрезеровании оказывается в 1.5–4 раза ниже ($R_a = 2–5.1$ мкм) по сравнению с точением ($R_a = 9–10$ мкм), что, в сочетании с увеличенной стойкостью инструмента и снижением частоты переналадок, подтверждает технологическую эффективность и перспективность применения сборной дисковой фрезы с СМП при восстановлении профиля катания колесных пар в условиях ремонтного и серийного производства.

5. Экспериментально доказано, что радиальные пластины АДКТ 1505 при фрезеровании сложных профилей демонстрируют преждевременный износ и

сколы (до 1.25 мм), в то время как тангенциальные пластины LNHU 1306 сохраняют работоспособность (износ 0.78 мм) в пределах нормативов (1–1.2 мм), в том числе при повышенных подачах. На основании полученных результатов рекомендовано использовать только тангенциальные пластины для обработки фасонных деталей мобильных колесных платформ, что реализовано в разработанной конструкции сборной дисковой фрезы.

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 ($R_z = 7\text{--}15$ мкм для рельс и $R_a = 6.3\text{--}10$ 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, $\varnothing 250\text{--}600$ 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 ($D_{\text{фр}} = 210\text{--}260$ мм, $z = 10\text{--}14$, наклон ножей $15\text{--}20^\circ$, 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 $0.009\text{--}0.38$ мм, B_k – $10.2\text{--}26.3$ 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 LNНУ 1306 и радиальными пластинами АДКТ 1505. При обработке сталей 40Х и 35ХГСН установлено, что износ LNНУ 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].

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 ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверков, К.В. Оптимизация технологического процесса ремонта колесных пар / К.В. Аверков, Т.Г. Бунькова, М.И. Бисерикан, С.В. Петроченко // Омский научный вестник. – 2018. – № 1 (157). – С. 19–22.
2. Базров, Б.М. Расчет точности машин на ЭВМ / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 1984. – 256 с.
3. Бисерикан, М.И. Обеспечение работоспособности колес грузовых вагонов, эксплуатируемых в условиях повышенных динамических нагрузок: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 / Бисерикан Михаил Иванович – Омск: ОмГУПС (ОМИИТ), 2013. – 138 с.
4. Бобрышев, Д.А. Разработка метода расчета точности сборных фасонных фрез на основе пространственного моделирования: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.07 / Бобрышев Денис Андреевич – Курск: ФГБОУ ВПО "Юго-Западный государственный университет", 2011. – 161 с.
5. Борисов, С.В. Разработка фасонных концевых фрез с винтовыми стружечными канавками на криволинейной поверхности вращения: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.03.01 / Борисов Сергей Вячеславович – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1998. – 122 с.
6. Бунькова, Т.Г. Повышение ресурса пары «колесо – рельс» за счет рационального подбора свойств материалов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 / Бунькова Тамара Геннадьевна – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО «ПГУПС», 2022. – 151 с.
7. Веселов, А.И. Повышение эффективности проектирования сборных фрез для обработки поверхностей сложного профиля на основе математического моделирования: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.03.01 / Веселов Александр Иванович – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000. – 195 с.
8. Гладышкин, А.О. Создание быстропереналаживаемых сборных фрез и технологии их применения для восстановления рельсового транспорта: дис. на

соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.03.01 и 05.02.08 / Гладышкин Алексей Олегович – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2009. – 114 с.

9. ГОСТ 10791-2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 27 с.

10. ГОСТ 11018–2011. Колесные пары тягового подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2012. – 26 с.

11. ГОСТ 14959-2016. Металлопродукция из рессорно-пружинной нелегированной и легированной стали. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 27 с.

12. ГОСТ 19042-80. Пластины сменные многогранные твердосплавные. Классификация. Система обозначений. Формы. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 18 с.

13. ГОСТ 25762-83. Обработка резанием. Термины, определения и обозначения общих понятий. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – 41 с.

14. ГОСТ 26595-2014. Фрезы торцовые с механическим креплением сменных многогранных пластин. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 11 с.

15. ГОСТ 28436-90. Фрезы концевые с механическим креплением многогранных твердосплавных пластин. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 5 с.

16. ГОСТ 28648-90. Колеса крановые. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 6 с.

17. ГОСТ 28719-90. Фрезы насадные торцово-цилиндрические с винтовыми зубьями со сменными твердосплавными пластинами. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2005. – 3 с.

18. ГОСТ 33722–2016. Остряки стрелочных переводов. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 17 с.

19. ГОСТ Р 51685–2013. Рельсы железнодорожные. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 95 с.

20. ГОСТ Р 52366–2005. Бандажи черновые для локомотивов железных дорог широкой колеи. Типы и размеры. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 5 с.
21. ГОСТ Р 53866-2010. Рельсы крановые. Технические условия. – Москва : Изд-во стандартов, 2010. – 9 с.
22. Гречишников, В.А. Наука и искусство системного моделирования инструментального обеспечения машиностроительных производств: монография / В.А. Гречишников. – М.: КУРС, 2016. – 376 с.
23. Гречишников, В.А. Повышение эффективности проектирования и эксплуатации инструмента для механообработки на основе системного моделирования: дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук: 05.03.01 / Гречишников Владимир Андреевич – М.: Мосстанкин, 1989. – 504 с.
24. Гречишников, В.А. Проектирование сборных и цельных режущих инструментов: учебное пособие / В.А. Гречишников, В.А. Кузнецов, П.М. Пивкин и др. – Москва: «Янус-К», 2025. – 300 с.
25. Гречишников, В.А. Проектирование сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами, расположенными вдоль винтовой стружечной канавки: монография / В.А. Гречишников, А.В. Исаев. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. – 158 с.
26. Гречишников, В.А. Проектирование специальных режущих инструментов: учебное пособие / В.А. Гречишников, П.М. Пивкин, В.А. Кузнецов, А.В. Исаев, А.Р. Мирзомахмудов, В.Б. Романов. – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2022. – 206 с.
27. Гречишников, В.А. Формализация процесса фрезоточения в виде модели взаимодействия между факторами, влияющими на процесс обработки / В.А. Гречишников, А.С. Приходько. // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2020 – № 4 (55) – С. 103–108.
28. Гречишников, В.А. Сборные фасонные фрезы со сменными режущими элементами, расположенными в осевой плоскости: монография / В.А. Гречишников, И.В. Чулин. – М.: ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН», 2014. – 121 с.
29. Грубый, С.В. Расчет сил и момента резания при фрезеровании

концевыми фрезами / С.В. Грубый // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2020 – № 10 – С. 26–37.

30. Евсеев, Д.Г. Технологические методы увеличения долговечности колес пассажирского железнодорожного вагона / Д.Г. Евсеев, В.П. Бирюков, М.Ю. Куликов, А.А. Якубовский // Транспортное машиностроение. – 2024. – №3. – С. 41-48.

31. Евсеев, Д.Д. Повышение периода стойкости фрез для обработки поверхности катания колесных пар: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.07 / Евсеев Дмитрий Дмитриевич – Орел: Орловский гос. техн. ун-т, 2010. – 145 с.

32. Иванов, И.А. Анализ напряженного состояния режущего инструмента при обточке колесных пар / И.А. Иванов, Д.А. Потахов, С.В. Урушев // Известия ПГУПС. – 2014. – № 1. – С. 114–124.

33. Иванов, И.А. Совершенствование процесса восстановления профиля поверхности катания колесных пар / И.А. Иванов, Д.П. Кононов, С.В. Урушев // Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – № 4. – С. 120–128.

34. Исаев, А.В. Разработка сборных фрез со сменными многогранными твердосплавными пластинами, расположенными на винтовой поверхности, для обработки заготовок с фасонным профилем: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.07 / Исаев Александр Вячеславович – М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ «Станкин», 2012. – 200 с.

35. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука. – 1974. – 564 с.

36. Коротков, И.А. Фрезерный инструмент: учебное пособие / И.А. Коротков, А.Г. Схиртладзе, В.П. Борискин. – Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2006. – 248 с.

37. Косов, М.Г. Моделирование точности при проектировании технологических машин: учебное пособие / М.Г. Косов, А.А. Кутин, Р.В. Саакян, Л.М. Червяков. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 1997. – 104 с.

38. Кузнецов, В.А. Системный анализ и моделирование машинного

оборудования: монография / В.А. Кузнецов. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 293 с.

39. Куликов, М. Ю. Особенности проектирования инструмента для операций фрезоточения / М.Ю. Куликов, Д.В. Волков // Вестник Брянского государственного технического университета № 10 (71) 2018. С. 12–19.

40. Куликов, М.Ю. Повышение износостойкости режущего инструмента при колесотокарной обработке / М.Ю. Куликов, А.Ю. Попов, Санн Маунг // Мир транспорта. 2015. – Том 13 – № 1. – С.70-76.

41. Куц, В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем: дис. на соиск. уч. ст. докт. техн. наук: 05.02.07 / Куц Вадим Васильевич – Курск: ФГБОУ ВПО "Юго-Западный государственный университет", 2012. – 366 с.

42. Либерман, Я.Л. Комплексный подход к ремонту колесных пар локомотивов и вагонов без выкатки / Я.Л. Либерман, С.Э. Баженов // Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции – Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2023. – С. 157–161.

43. Лукина, С.В. Повышение эффективности проектирования сборного режущего инструмента на базе установленных взаимосвязей конструкторско-технологических и экономических решений: дис. на соиск. уч. степ. докт. техн. наук: 05.03.01 / Лукина Светлана Валентиновна – Москва, 1999. – 448 с.

44. 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. – В печати.

45. 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.

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

47. 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 Междунар. науч.-техн. конф. – Минск: Бизнесофсет – 2023. – С. 47–49.

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

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

53. Патент № 101044 Российская Федерация, МПК E01B 31/17. Поезд для шлифования рабочей поверхности головки обоих рельсов / Чевычелов С.А., Емельянов С.Г. – № 2010119872; заявл. 18.05.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1 – 6 с.

54. Патент № 103317 Российская Федерация, МПК B23C 5/06. Фреза торцевая для обработки валов с равноосным контуром / Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. – № 2010122286; заявл. 01.06.2010; опубл. 10.04.2011, Бюл. № 10. – 4 с.

55. Патент № 106576 Российская Федерация, МПК B23C 5/06. Фреза дисковая для обработки валов с равноосным контуром / Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. – № 2010134439; заявл. 17.08.2010; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20. – 7 с.

56. Патент № 198166 Российская Федерация, МПК B23C 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.

57. Патент № 209261 Российская Федерация, МПК B23B 5/32. Станок для обточки колесных пар без выкатки из-под подвижного состава / Смородин М.П. – № 2021125013; заявл. 24.08.2021; опубл. 10.02.2022, Бюл. № 4. – 5 с.

58. Патент № 217298 Российская Федерация, МПК B23C 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.

59. Патент № 2253548 Российская Федерация, МПК B23C 5/00. Адаптирующаяся фреза / Степанов Ю.С., Тарапанов А.С., Харламов Г.А., Евсеев Д.Д., Афанасьев Б.И., Фомин Д.С., Кривцов В.И. – № 2004106135/02; заявл. 02.03.2004; опубл. 10.06.2005, Бюл. № 16. – 7 с.

60. Патент № 226382 Российская Федерация, МПК B23C 3/02. Силовая малогабаритная головка для фрикционного фрезоточения колес рельсового транспорта / Куликов Ю.М., Попов А.Ю., Рыгин Р.Е., Мироненко Н.О., Куликов М.Ю. – № 2024105393; заявл. 01.03.2024; опубл. 31.05.2024, Бюл. № 16. – 8 с.

61. Патент № 226505 Российская Федерация, МПК В23С 3/02, В23С 5/14, Е01В 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.

62. Патент № 228044 Российская Федерация, МПК В23С 3/02, В23С 5/14, Е01В 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.

63. Патент № 2291929 Российская Федерация, МПК Е01В 31/13, В23С 3/00. Способ формирования профиля головки рельсов профильными фрезами, оснащенными сменными многогранными пластинами, и фрезы для профильной обработки рельсов / Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. – № 2005104093/11; заявл. 15.02.2005; опубл. 20.01.2007, Бюл. № 2. – 8 с.

64. 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.

65. Патент № 2420624 Российская Федерация, МПК Е01В 5/00. Железнодорожный рельс, способ обработки гиперболических рельсов и фреза для реализации способа / Емельянов С.Г., Чевычелов С.А. – № 2008106300/11; заявл. 18.02.2008; опубл. 10.06.2011, Бюл. № 16. – 7 с.

66. Патент № 2555298 Российская Федерация, МПК В23С 3/00, Е01В 31/13. Устройство для чистовой обработки резанием поверхности катания головки рельса / Рунгер Х. – № 2012135705; заявл. 21.01.2011; опубл. 10.07.2015, Бюл. № 19. – 13 с.

67. Патент № 2607506 Российская Федерация, МПК В23С 1/20, В23Q 3/155, Е01В 31/13. Передвижное устройство для фрезерования головок рельсов / Меверт Ф. – № 2015118571; заявл. 18.05.2015; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1. – 27 с.

68. Патент № 2717756 Российская Федерация, МПК В23В 5/32. Устройство для обработки профиля бандажа колесных пар без выкатки / Жуков С.Н., Королев

В.А. – № 2019143629; заявл. 25.12.2019; опубл. 25.03.2020, Бюл. № 9. – 11 с.

69. Патент № 2734551 Российская Федерация, МПК В23В 5/32. Устройство и способ одновременной механической обработки нескольких колесных пар рельсового транспортного средства / Науманн Дж. О., Мингерс Г., Науманн Х.-Ю. – № 2020110344; заявл. 10.07.2018; опубл. 20.10.2020, Бюл. № 29. – 31 с.

70. Патент № 2754627 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ восстановления профиля поверхности катания колес рельсового транспорта / Новиков С.В., Гершман И.С. – № 2020131127; заявл. 22.09.2020; опубл. 06.09.2021, Бюл. № 25. – 12 с.

71. Патент № 2759298 Российская Федерация, МПК E01В 31/17. Способ обработки поверхности головки рельса и устройство для его осуществления / Ильиных А.С., Банул В.В. – № 2021103701; заявл. 12.02.2021; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 32. – 12 с.

72. Патент № 2773258 Российская Федерация, МПК В23В 5/28. Система для восстановления профиля колесной пары железнодорожного транспортного средства / Чу М.Х., Отгон Дж.Г., Батлер Э.С. – № 2020126588; заявл. 10.01.2019; опубл. 01.06.2022, Бюл. № 16. – 34 с.

73. Патент № 2792556 Российская Федерация, МПК В24В 39/02. Способ восстановления профиля по меньшей мере одного рельса / Хофманн Ш. – № 2022117272; заявл. 04.12.2020; опубл. 22.03.2023, Бюл. № 9. – 26 с.

74. Патент № 2809615 Российская Федерация, МПК В23Р 6/00, В23С 3/04, В23Р 25/00. Способ восстановления профиля поверхности катания колес рельсового транспорта / Попов А.Ю., Куликов Ю.М., Новиков С.В., Гершман И.С., Куликов М.Ю. – № 2022130815; заявл. 28.11.2022; опубл. 13.12.2023, Бюл. № 35. – 13 с.

75. Патент № 2811301 Российская Федерация, МПК В23С 5/08, E01В 31/13. Комбинированный режущий инструмент для фрезерования рельсов на месте установки / Чзан Б., Цай Ч., Чжу С., Ван Л., Хань Ш., Чэнь Ч., Вэй Ц., Ли Ч., Сюй Л. – № 2023103145; заявл. 20.07.2021; опубл. 11.01.2024, Бюл. № 2. – 21 с.

76. Патент № 2820911 Российская Федерация, МПК В23В 5/32.

Приспособление для обточки железнодорожных колес без снятия их с транспортных средств / Кавинин И.А., Степанов В.В., Витовский В.В. – № 2022118717; заявл. 07.07.2022; опубл. 11.06.2024, Бюл. № 17. – 15 с.

77. Патент № 2746202 Российская Федерация, МПК В23С 3/00, В23С 5/00, Е01В 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.

78. Патент № 2746204 Российская Федерация, МПК В23С 3/00, В23С 5/00, Е01В 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.

79. 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.

80. Патент № 99785 Российская Федерация, МПК Е01В 31/02. Поезд для обработки рабочей поверхности головки обоих рельсов / Чевычелов С.А., Емельянов С.Г. – № 2010119873/11; заявл. 18.05.2010; опубл. 27.11.2010, Бюл. № 33. – 7 с.

81. Плавник, С.Л. Повышение надежности процессов изготовления деталей фасонным фрезерованием: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.08 / Плавник Светлана Леонидовна – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2004. – 173 с.

82. Рауба, А.А. Инструментальное обеспечение механической обработки при ремонте деталей подвижного состава / А.А. Рауба, А.Ю. Попов, Д.В. Муравьев // Национальные приоритеты России. – 2009. – №1. – С.87–94.

83. Сан Маунг. Повышение эффективности изготовления и восстановления колесных пар подвижного состава путем совершенствования режущего инструмента (в условиях железных дорог Мьянмы): дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 и 05.02.07 / Сан Маунг – М.: МГУПС (МИИТ), 2015. – 135 с.

84. 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.

85. 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.

86. 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.

87. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. С74 Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерикова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. 496 с., ил.

88. Таратынов, О.В. Проектирование и расчет металлорежущего инструмента на ЭВМ: Учеб. пособие для вузов / О.В. Таратынов, Г.Г. Земсков, Ю.П. Тарамыкин и др.; Под ред. О.В. Таратынова, Ю.П. Тарамыкина. – М.: Высш. Шк., 1991. – 423 с.

89. Терехов, П.М. Совершенствование восстановления бандажей колесных пар повышенной твердости: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.22.07 / Терехов Павел Михайлович – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВПО «ПГУПС», 2013. – 146 с.

90. Фу, К. Робототехника: учебное пособие. пер. с англ. / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли. – М.: Мир, 1989. – 624 с.

91. Чевычелов, С.А. Повышение эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием процесса репрофилирования рельсов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.03.01 / Чевычелов Сергей Александрович – Орёл: Курский государственный технический университет, 2005. – 189 с.

92. Чулин, И.В. Сборные фасонные фрезы со сменными режущими элементами, расположенными в осевой плоскости: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.07 / Чулин Илья Вячеславович – М.: ФГБОУ ВПО «МГТУ «СТАНКИН», 2014. – 121 с.

93. Шитиков, А. Н. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.03.01 / Шитиков Александр Николаевич – Тула: Курский государственный технический университет, 2007. – 167 с.

94. Ящерицын, П.И. Теория резания: учеб. / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич – 2-е изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006. – 512 с.

95. Corral, E. New support roller profile design for railway wheel re-profiling process by under-floor lathes with a single cutting tool / E. Corral, J. Meneses, M.J. Gómez García, C. Castejón, J.C. García-Prada // Scientific Reports. – 2022. – Vol. 12. – P. 104.

96. Filipowicz, K. Technological problems in machining of resilient wheelsets on wheel-turning lathes with friction drive / K. Filipowicz, W. Biedunkiewicz, M. Królikowski, D. Grzesiak // Advances in Manufacturing Science and Technology. 2012. Vol. 36, No. 1. Pp. 55–63.

97. Ghionea, A.L. Determination of the cutting parameters and forces for the rolling surfaces machining in the re-manufacturing of the wheelset wheels: some research and results / A.L. Ghionea, I.G. Ghionea // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 749. – P. 12-14.

98. Ghionea, I.G. Cutting Parameters and Analysis by FEA Simulation of Their Influence on the Re-Profiling of the Wheels of the Railway Wheelset / I.G. Ghionea, A.L. Ghionea, N. Predinca // Acta Technica Napocensis. Series: Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering. – 2018. – Vol. 61, Issue 1. – P. 73-84.

99. Patent № 2896745 A1 European Patent Office. Milling tool / M. Suchý; applicant Pramet Tools, S.R.O. – № EP14151254.1; filed 15.01.2014; publ. 22.07.2015, Bull. 2015/30. – 21 p.

100. Shapovalov, V. Modeling of a duplex miller and conditions of formation of treatment of wheel pairs of main electric locomotives, diesel locomotives, and electric sections / V. Shapovalov, A. Permyakov, A. Klochko // Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. – 2019. – No. 3 (9). – P. 118–126.

101. Sladkowski, A. Increasing the resource of milling cutters used to process the locomotive wheelsets. Part 2: Study of Stressed-Deformed State / A. Sladkowski, Yu. Proydak, V. Ruban // Transport Problems. 2020. Vol. 15. No. 3.

102. Sladkovsky, A.V. Comparative analysis of the technology for restoring the working surface of locomotive wheels during depot repair / A.V. Sladkovsky, V.N. Ruban // Mehanika, komp'yuter, obrazovanie. – 2001. – P. 36-47.

103. Sladkowski, A. Increase of Resource of the Shaped Milling Cutters for KG20 Machine-Tools / A. Sladkowski, Yu. Proydak, V. Ruban // Transport Problems: VII International Symposium of Young Researchers. Katowice: Silesian University of Technology, 2018. pp. 945-952.

104. Sladkowski, A. Increasing the Efficiency of Using Cutting Elements for Special Shaped Milling Cutters for KZh20 Machines / A. Sladkowski, V.M. Ruban // Technical Engineering. – 2020. – № 1 (85). – P. 71–80.

Конструкторско-технологическая документация сборной дисковой фрезы

Формат	Зона	Лист	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
<i>Документация</i>						
A2			АСП-21-02.00.00.СБ	Фреза корпусная	1	
				Сборочный чертеж		
<i>Детали</i>						
A2	1		АСП-21-02.00.01	Корпус	1	
<i>Стандартные изделия</i>						
		2	LNHU 130608ER-MR2 AP301U	Пластина тангенциальная	10	
		3	HM90 ADKT1505PDR-HM IC908	Пластина радиальная	10	
		4		Винт М3.5x12Тоgх	20	
АСП-21-02.00.00.СП						
Изм		Лист	№ докум	Подп.	Дата	
Разраб		Мирзомахмудов				
Проб.						
Н.контр						
Утв.						
				Фреза корпусная	Лит	Лист
					1	Листов
						1
				МГТУ "СТАНКИН"		
				Копировал		
				Формат А4		

Рис. П.1.1 – Спецификация дисковой фрезы с СМП.

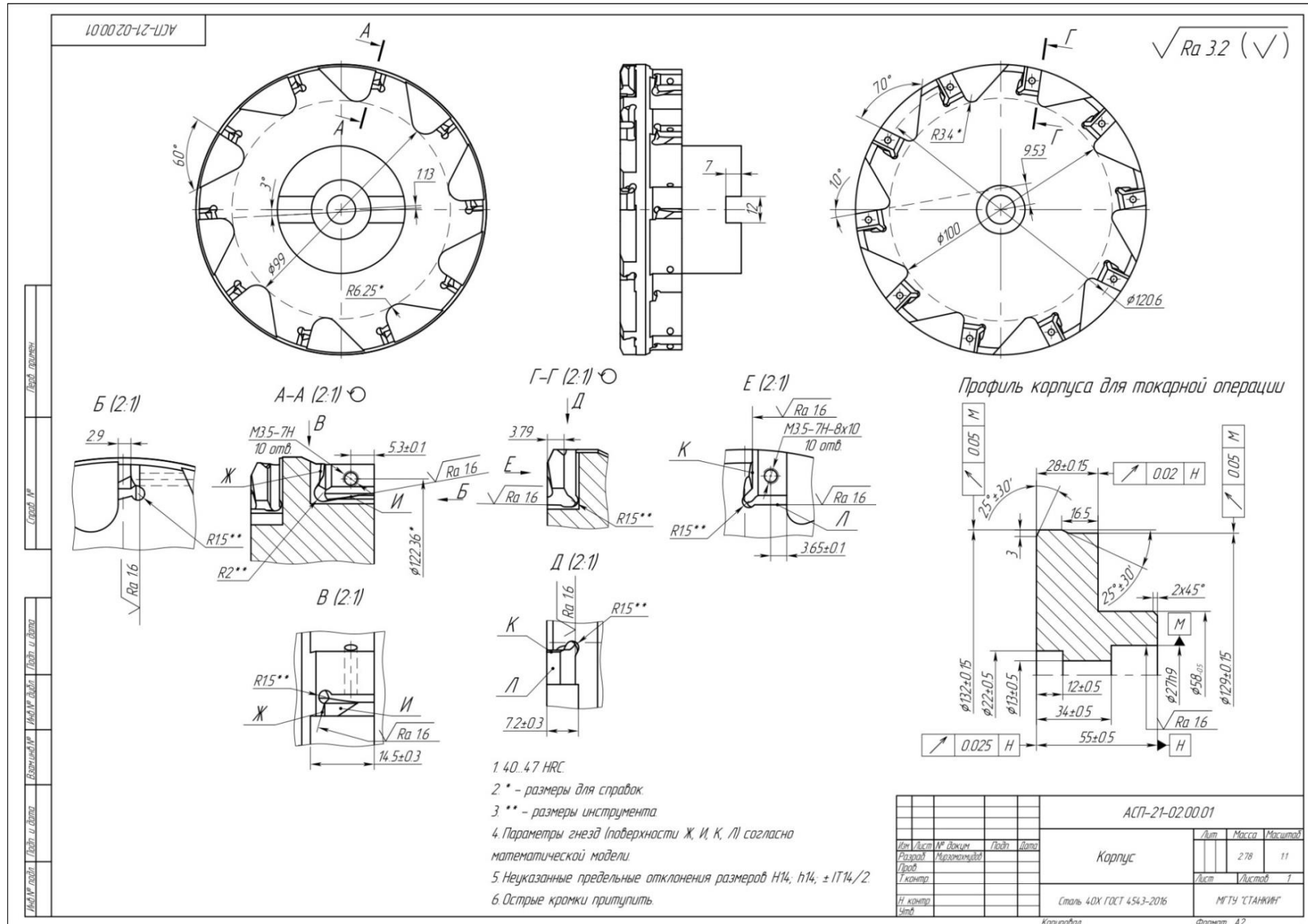


Рис. П.1.2 – Рабочий чертеж корпуса разработанной конструкции дисковой фрезы с СМП.

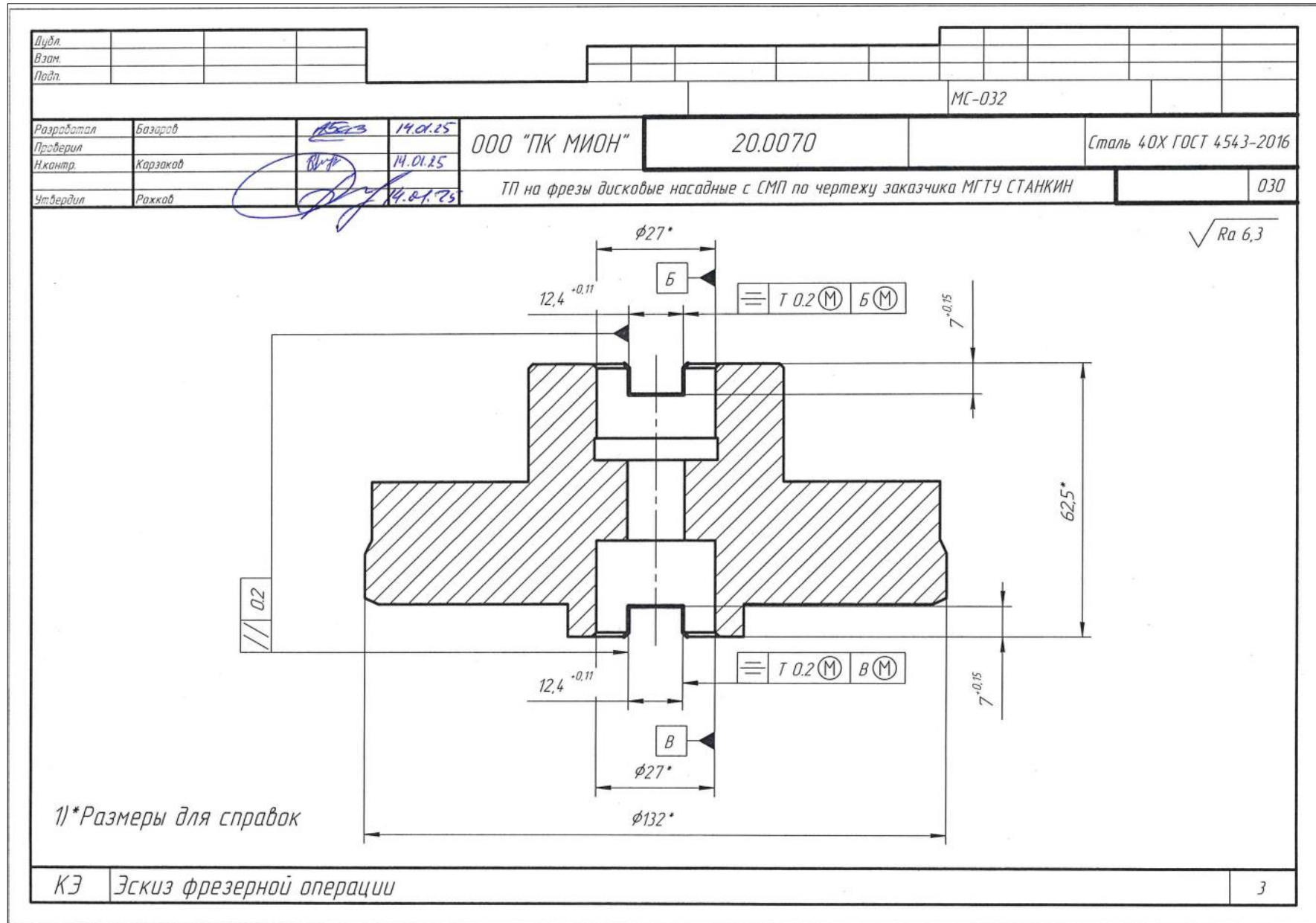



Рис. П.1.5 – Эскиз фрезерной операции для формирования шпоночных пазов.

Сведения, предоставленные промышленными предприятиями



ДЕМИХОВСКИЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД

д. Демихово, г. Орехово-Зуево,
Московская область, Россия, 142632
Тел.: +7 496 416 64 01
Факс: + 7 496 416 60 08
Email: ood@dmzavod.ru
www.dmzavod.ru

№ 0306/ _____

На _____ от _____ г.

О предоставлении информации


ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»
Заведующему кафедрой
Инструментальной техники и технологии
формообразования
В.А. Кузнецову

Уважаемый Владимир Анатольевич!

В ответ на Ваш запрос о режимах обработки профиля катания бандажа 890 ГОСТ 5000-83 из стали 2 ГОСТ 398-2010 сообщую, что машинное время обработки составляет 33,58 мин при использовании следующих режимов резания:


D или B	L	T	I	S	N	V
1100 мм	175 мм	1,5 мм	2	14,5 мм/мин	12,8 об/мин	44,6 м/мин
1060 мм	85 мм	2 мм	2	18 мм/мин	12,8 об/мин	42,6 м/мин

С уважением,
Руководитель проектов




Ю.А. Гринёв

Исполнитель:
Кострюков Александр Андреевич
Тел. 8-906-079-21-54



СК ИСО 9001



СИСТЕМА
ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ
СЕРТИФИКАЦИИ
ОПЖТ
ISO 22163

Система менеджмента предприятия
сертифицирована на соответствие требованиям
ГОСТ Р ИСО 9001-2015, ISO 22163:2023

Рис. П.2.1 – Информационное письмо.



ТВЕРСКОЙ
ВАГОНОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД

Открытое акционерное общество
«Тверской вагоностроительный завод»
170003, Россия, г. Тверь,
Петербургское шоссе, д. 45-б
Тел.: +7 4822 79 33 00
Email: tvz@tvz.ru
www.tvz.ru

№ _____

На № _____ от _____

ФГБОУ ВО «СТАНКИН»

Заведующему кафедрой

Инструментальной техники и технологии

формообразования

В.А. Кузнецову

О предоставлении информации

Уважаемый Владимир Анатольевич!

Сообщаю Вам, что машинное время обработки профиля катания колеса Колесной пары 957-П-176.5- ГОСТ 4835-2013 (РВЗШ) из стали 2 ГОСТ 10791-2011 составляет 24,25 мин при использовании следующих режимов резания:

№ перехода	D или B	L	T	S	N	V
1	1010 мм	175 мм	3,5 мм	15,5 мм/мин	11 об/мин	35 м/мин
2	1009 мм	175 мм	1 мм	18 мм/мин	18 об/мин	57 м/мин

С уважением,
Главный технолог

Сигрийчук А.В.

Рис. П.2.2 – Информационное письмо.

Акт приемки и внедрения



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

Промышленная компания МИОН

УТВЕРЖДАЮ

И. И. И.

« 02 » 2025 г.



АКТ
 приемки инструмента производства ООО «ПК МИОН»

Наименование: Фреза торцовая специальная 2-х рядная
ИТнТФ-MirzoAzim-DФР
135 x 30.85 x 131.35-LNHU1306/ADKT1505

Место проведения	Производственный цех (участок ОТК) ПК МИОН, г. Томск
Период проведения испытания	<i>3.02.2025 г.</i>
Модель станка Режимы обработки	MCV-400 Sz = 0.05 мм/зуб, Vрез. = 90 м/мин
Инструмент	Фреза торцовая специальная 2-х рядная ИТнТФ-MirzoAzim-DФР 135 x 30.85 x 131.35-LNHU1306/ADKT1505 Режущие пластины: 1. LNHU1306 2. ADKT1505
Марка твердого сплава (Маркировка на пластине)	-
Обрабатываемая деталь, материал Параметры обработки	Прокат, сталь 12Х13 ГОСТ 5632-72 (НВ200) Глубина-5 мм, Ширина-75 мм
Операция	Фрезерование уступа, фрезерование плоскости
Условия обработки	Средние, без СОЖ
Время обработки, мин Износ по задней пов-ти, мм	40 Не отмечено

Цель испытаний: Определение работоспособности и эксплуатационных возможностей инструмента

Результаты испытаний:

1. Инструмент работоспособен, сколов и выкрашивания режущих кромок СМП не обнаружено.
2. Корпус фрезы и фреза в сборе соответствует требованиям КД.
3. Корпус фрезы и СМП пригодны для дальнейшей эксплуатации.

И. И. И.

(должность)

Б. В. В.

(подпись)

Романов Н. П.

(Ф.И.О.)

И. И. И.

(должность)

Б. В. В.

(подпись)

Базаров А. С.

(Ф.И.О.)

(должность)

(подпись)

(Ф.И.О.)

634034, Россия, г.Томск, ул. Вершинина, 46/6. А/я 427.
 Тел/факс (3822)21-30-37; 99-65-02;99-65-01 E-mail: pk-mion@mail.ru, www.mion.tomsk.ru

Рис. П.3.1 – Акт приемки изготовленной дисковой фрезы с СМП.

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по образовательной
деятельности и молодежной политике
ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»к.т.н., доцент
М.В. Бильчук

07 20 25 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы
«Повышение стойкости сборных фрез со сменными многогранными пластинами для
обработки фасонных поверхностей деталей мобильных колесных платформ»
аспиранта Мирзомахмудова А.Р.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований условий фрезерования фасонных поверхностей с переменной твердостью материала заготовок, выполненные аспирантом на основе разработанных математических моделей, а также предложенные им конструктивные решения сборных фасонных фрез со сменными многогранными пластинами внедрены в учебный процесс при реализации образовательных программ ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Разработанные подходы к определению геометрических и кинематических параметров фрез, включая расчет задних углов, остаточной микрогеометрии и параметров срезаемого слоя, а также результаты сравнительной оценки стойкости различных типов сменных пластин для сборных фрез использованы при проведении лекционных, практических и лабораторных занятий по направлениям подготовки 15.03.05 и 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».


Материалы диссертации внедрены в содержание дисциплин по курсам бакалавриата (направление подготовки 15.03.05) «Производство инструментальной техники», «Специальные технологии изготовления инструментальной техники» и магистратуры (направление подготовки 15.04.05) «Инновационные технологии в инструментальном производстве» кафедры «Инструментальная техника и технологии формообразования» ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН».

Лектор курса
доцент кафедры «Инструментальная техника
и технологии формообразования»
к.т.н., доцент



А. В. Исаяев

Заведующий кафедрой
«Инструментальная техника
и технологии формообразования»
д.т.н., профессор



В.А. Кузнецов

Рис. П.3.2 – Акт внедрения в учебный процесс результатов работы.

ЛВЧД-7 Москва-3 АО «ФПК»**АКТ от 10.06.2025 г. о внедрении
технологических рекомендаций по повышению производительности и
качества обработки сборными фрезами деталей железнодорожного состава,
имеющих сложный профиль**

В пассажирском вагонном депо «Москва-3» ЛВЧД-7 московского филиала АО «ФПК» были рассмотрены и внедрены в производство технологические рекомендации, приведенные в диссертационном исследовании Мирзوماхмудова А.Р. по теме: «Повышение стойкости сборных фрез со сменными многогранными пластинами для обработки фасонных поверхностей деталей мобильных колесных платформ».

Дисковая фреза со сменными многогранными пластинами (СМП) была использована для формирования геометрии профиля катания колесных пар железнодорожного состава по ГОСТ 11018-2011 на опытных образцах, имеющих физико-механические свойства материала, близкие к свойствам реальной колесной пары.

Режимы механической обработки были выбраны в соответствии с рекомендациями, разработанными в рамках вышеуказанного диссертационного исследования:

Параметры	Значение	
Диаметр колеса D, мм	957	
Длина участка профиля L1 и L2, мм	114	17
Глубина резания t, мм	1.5	
Подача Sz, мм/зуб	0.07	0.05
Скорость резания V, м/мин	220	220

В результате был получен профиль колесной пары, соответствующий установленным требованиям по геометрической и размерной точности, проверенный контрольным шаблоном ТЗ.8384-4639.

Сравнительный анализ с действующей технологией, основанной на применении токарных резцов с СМП, показал, что повышение стойкости режущего инструмента (до смены режущей кромки СМП) составило около 30 % (со 150 мин до 196 мин). При этом сохраняется производительность обработки (основное (машинное) время около 30 мин) и необходимые параметры геометрической точности и качества поверхности.

Учитывая вышеизложенное, данный инструмент может быть рекомендован для использования в технологических процессах формирования геометрии профиля катания цельнокатаного колеса при восстановлении колесных пар в ЛВЧД-7 Москва-3 Московского филиала АО «ФПК».

**Начальник пассажирского
вагонного депо Москва-3**



Курин П.С.

Рис. П.3.3 – Акт внедрения результатов работы.

Достижения



Рис. П.4.1 – Золотая медаль на международной выставке изобретений Kaohsiung International Invention & Design Expo, (Тайвань, 2022).



Рис. П.4.2 – Серебряная медаль на Всемирном изобретательском форуме Global Invention Forum in Cyprus (г. Лимассол, Кипр, 2024).

**XXVIII Московский международный
Салон изобретений и инновационных технологий**



«АРХИМЕД 2025»

ДИПЛОМ

*Решением Международного Жюри
награждается*

СЕРЕБРЯНОЙ МЕДАЛЬЮ

*Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
технологический университет «Станкин»
авторы: Мирзомахмудов Азимжон Рустамович,
Самсоненко Григорий Андреевич, Исаев Александр Вячеславович,
Домнин Петр Валерьевич
за проект: «Дисковая фреза для обработки бандажей колесных пар»*

**Председатель
Международного Жюри,
академик,
вице-президент РАН**

С.М. Алдошин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

**Руководитель
Федеральной службы
по интеллектуальной
собственности**

Ю.С. Зубов

Россия, Москва, 18.03 - 20.03.2025 г.

Рис. П.4.3 – Серебряная медаль на XXVIII Международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед-2025» (г. Москва, 2025).

**XXVI Московский международный
Салон изобретений и инновационных технологий**



«АРХИМЕД 2023»

ДИПЛОМ

*Решением Международного Жюри
награждается*

БРОНЗОВОЙ МЕДАЛЬЮ

ФГБОУ ВО "МГТУ" СТАНКИН"

*авторы: Гречишников В. А., Исаев А. В., Пивкин П. М.,
Кузнецов В. А., Надыкто А. Б., Назаренко Е. С.,
Мирзомахмудов А. Р.
за проект: «Сборная фреза»*

**Председатель
Международного Жюри,
академик,
вице-президент РАН**

С.М. Алдошин

Президент Салона

Д.И. Зезюлин

**Руководитель
Федеральной службы
по интеллектуальной
собственности**

Ю.С. Зубов

Россия, Москва, 28.03 - 30.03.2023 г.

Рис. П.4.4 – Бронзовая медаль на XXVI Международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед-2023» (г. Москва, 2023).



Рис. П.4.5 – Международный патент на изобретение ЕА № 040649 от 25.02.2021 г.



Рис. П.4.6 – Патент на изобретение РФ № 2746202 от 09.06.2020 г.



Рис. П.4.7 – Патент на изобретение РФ № 2746204 от 09.06.2020 г.



Рис. П.4.8 – Патент на изобретение № 2850946 от 24.02.2025 г.



Рис. П.4.9 – Патент на полезную модель РФ № 198166 от 14.01.2020 г.



Рис. П.4.10 – Патент на полезную модель РФ № 217298 от 13.12.2022 г.



Рис. П.4.11 – Патент на полезную модель РФ № 226505 от 29.01.2024 г.



Рис. П.4.12 – Патент на полезную модель РФ № 228044 от 28.12.2023 г.



Рис. П.4.13 – Патент на полезную модель РФ № 231960 от 05.09.2024 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ
№ 2021681009

**Calculation of residual roughness of railway wheelsets
(RRRW)**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (RU)*

Авторы: *Исаев Александр Вячеславович (RU), Гречишников Владимир Андреевич (RU), Мирзомахмудов Азимжон Рустамович (TJ), Халухаева Лейла Махиматовна (KZ)*

Заявка № **2021680230**
Дата поступления **08 декабря 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **16 декабря 2021 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности


Г.П. Измаилов

Рис. П.4.14 – Св-во на программу для ЭВМ № 2021681009 от 08.12.2021 г.



Рис. П.4.15 – Св-во на программу для ЭВМ № 2024610723 от 28.12.2023 г.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2025693726

САПР сборной фасонной фрезы с СМП

Правообладатель: **Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (RU)**

Авторы: **Мирзомахмудов Азимжон Рустамович (RU), Исаев Александр Вячеславович (RU), Тагаев Арсен Ильнурович (RU)**

Заявка № **2025692298**

Дата поступления **19 ноября 2025 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **01 декабря 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов