

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

На правах рукописи



Матлыгин Георгий Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ОСЕВОГО
РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИЗ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СТАЛЕЙ
МЕТОДОМ ФРЕЗОТОЧЕНИЯ**

Специальность: 2.5.6. Технология машиностроения

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических
наук, доцент Савилов А.В.

Иркутск - 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
1.1 Фрезоточение.....	16
1.2 Кинематические схемы фрезоточения.....	23
1.2.1 Ортогональное фрезоточение.....	24
1.2.2 Тангенциальное фрезоточение.....	25
1.2.3 Коаксиальное фрезоточение.....	27
1.3 Анализ особенностей быстрорежущих сталей.....	30
1.4 Конструктивные особенности изделий, изготавливаемых из быстрорежущих сталей.....	38
1.5 Предлагаемое применение технологии фрезоточения для производства режущих инструментов.....	41
1.6 Основные выводы, постановка цели и задач исследования.....	47
2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОРТОГОНАЛЬНОГО ФРЕЗОТОЧЕНИЯ.....	50
2.1 Входные параметры при фрезоточении.....	50
2.2 Математическая модель формирования шероховатости при ортогональном фрезоточении.....	52
2.3 Статическая математическая модель ортогонального фрезоточения.....	63
2.3.1 Математическая модель шероховатости поверхности.....	63
2.3.2 Математическая модель температуры в зоне резания.....	64
2.3.3 Моделирование зависимости «огранки» от входных параметров.....	65
2.3.4 Математическая модель сил резания.....	67
2.4 Выводы по второй главе.....	71
3 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	72
3.1 Оборудование и средства технического оснащения для проведения исследования.....	72
3.2 Заготовки для проведения исследования.....	76
3.3 Режущий инструмент для проведения исследования.....	77
3.3.1 Выбор осевого инструмента для ортогонального фрезоточения.....	77

3.3.2	Выбор режущего инструмента для исследования обрабатываемости....	80
3.4	Режимы резания для проведения исследования.....	81
3.4.1	Режимы резания для ортогонального фрезоточения фрезой со сменными многогранными пластинами.....	81
3.4.2	Режимы резания для ортогонального фрезоточения монолитной твердосплавной фрезой.....	82
3.4.3	Режимы резания для токарной обработки.....	82
3.5	Средства измерения для проведения исследования.....	82
3.5.1	Прибор для измерения шероховатости поверхности.....	83
3.5.2	Прибор для измерения температуры в зоне резания.....	84
3.5.3	Прибор для измерения «огранки» цилиндрической поверхности.....	87
3.5.4	Прибор для измерения сил резания.....	89
3.6	Выводы по третьей главе.....	92
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ.....	94
4.1	Исследование влияния режимов резания и типа инструмента на шероховатость поверхности.....	95
4.1.1	Исследование шероховатости поверхности с применением фрезы со сменными многогранными пластинами.....	95
4.1.2	Исследование шероховатости поверхности с применением монолитной твердосплавной фрезы.....	103
4.2	Исследование влияния режимов резания на температуру в зоне резания.....	108
4.2.1	Исследование влияния температуры в зоне резания с применением фрезы со сменными многогранными пластинами.....	109
4.3	Исследование влияния режимов резания на формирование отклонения формы цилиндрической поверхности.....	113
4.4	Исследование влияния силы резания на обрабатываемость быстрорежущих сталей.....	119
4.5	Внедрение полученных результатов исследований, с представлением практического эффекта.....	123
4.6	Эффективность использования фрезоточения в сравнении с классическим точением.....	125

4.7 Технологические рекомендации по применению операции ортогонального фрезоточения в инструментальном производстве.....	129
4.7.1 Рекомендации по выбору оборудования.....	129
4.7.2 Рекомендуемые к обработке материалы.....	130
4.7.3 Рекомендуемые марки материала и параметры инструмента.....	130
4.7.4 Рекомендации по назначению режимов резания для операции ортогонального фрезоточения.....	131
4.7.5 Рекомендации по метрологическому обеспечению операционного контроля качества поверхности осевого режущего инструмента.....	132
4.7.6 Рекомендуемый технологический маршрут выполнения операции фрезоточения.....	133
4.7.7 Преимущества процесса ортогонального фрезоточения.....	135
4.8 Выводы по четвертой главе.....	136
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	138
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ А П.1 Результаты измерений шероховатости поверхности.....	155
ПРИЛОЖЕНИЕ Б П.2 Результаты измерений температуры в зоне резания.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ В П.3 Результаты измерений «огранки» при ортогональном фрезоточении.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	183
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акт результатов работы.....	184
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Заключение ФГБУ РАН.....	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Анализ современных технологий изготовления осевого инструмента из быстрорежущих сталей показывает, что данный процесс может быть оптимизирован с помощью многозадачных станков, которые позволяют сосредоточить операции на одном рабочем месте. Этот метод отличается от традиционных подходов, требующих использования нескольких типов станков, таких как токарные, фрезерные, сверлильные и специализированные. Использование многозадачных станков может также сократить количество оборудования с ЧПУ (с числовым программным управлением) необходимого для производства, уменьшить площадь производственных помещений и количество персонала.

Наибольший эффект от интенсификации процессов резания получают в отраслях, где на высокопроизводительном оборудовании, изготавливаются детали из труднообрабатываемых материалов. К труднообрабатываемым материалам в инструментальном производстве относятся кобальтовые быстрорежущие стали увеличенной производительности. Лезвийный инструмент из быстрорежущей стали сегодня чрезвычайно востребован отечественной промышленностью для решения широкого спектра технологических задач, связанных с необходимостью обработки деталей машиностроения, изготавливаемых из титана, жаропрочных сплавов, нержавеющей и легированных сталей. Для обработки осевого режущего инструмента, в частности фрез, разверток, зенкеров, метчиков и т.п., применяется метод контурной обработки. Данная технология позволяет выполнять обработку поверхностей, образующих контур детали, за несколько установок заготовки. При этом возможности современного высокопроизводительного оборудования позволяют применять более прогрессивные технологии ортогонального, тангенциального, а также коаксиального фрезоточения. Указанные технологии позволяют сократить количество переустановок заготовки и снизить количество используемого в процессе обработки инструмента за счет концентрации операций точения и фрезерования на одном рабочем месте и используя только один инструмент - фрезу.

Важным фактором при выборе способов повышения качества и производительности обработки деталей является экономическая эффективность данных методов, которая позволяет снизить себестоимость готовой продукции. Это особенно важно в условиях единичного и мелкосерийного производства. Резервы повышения производительности технологического процесса изготовления осевого режущего инструмента из быстрорежущих сталей видятся в интенсификации режимов обработки и концентрации операций и инструмента на многозадачном станке.

В настоящий момент отсутствуют эффективные и широкодоступные изготовителям режущего инструмента технологические решения для повышения эффективности предварительной механической обработки осевого режущего инструмента до этапа термической обработки, которые могли бы обеспечить увеличение количества изготавливаемого инструмента в плановый период.

Степень разработанности темы исследования. Фрезоточение имеет ряд преимуществ перед стандартным точением, одним из которых является повышенное качество обработанной поверхности. Некоторые исследователи отмечают, что при фрезоточении можно достичь уровня шероховатости поверхности, который лучше, чем при обычном точении, в несколько раз. Однако фрезоточение также имеет определенные недостатки, так как не может обеспечить идеальной круглости формы. Отклонения формы детали зависят от геометрии режущей части инструмента и режимов резания. Занижение режимов резания может уменьшить отклонения формы детали, но также способно уменьшить эффективность фрезоточения. Важно проводить предварительный анализ, чтобы оценить отклонения размера и круглости, заданных в конструкторской документации. Соотношение скоростей вращения инструмента и заготовки, а также ширина резания являются основными факторами, влияющими на отклонения круглости.

При обработке быстрорежущих сталей выделяется большое количество тепла из-за высоких сил резания. Разогрев инструмента и обрабатываемого материала приводит к негативным изменениям в микроструктуре заготовки и

инструмента. Воздействие высоких сил резания и температур вызывает ускоренный износ режущих кромок инструмента. Поэтому существует необходимость контроля температуры в зоне резания для исключения фазовых изменений микроструктуры заготовки и обеспечения заданной стойкости инструмента.

Таким образом, оптимизация процессов резания по критерию минимизации температуры позволит достигнуть максимально возможной производительности для заданной технологической системы.

Объектом исследований работы являются различные виды осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали (фрезы, сверла, развертки и т.д.), предназначенные для обработки титана, жаропрочных сплавов, нержавеющей и легированных сталей, применяемых в машиностроении в качестве конструкционных материалов для изготовления ответственных изделий.

Предметом исследований является качество поверхности изготавливаемого осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали, полученное методом ортогонального фрезоточения.

Поэтому актуальной **целью настоящей работы** является повышение эффективности обработки осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали за счет применения метода фрезоточения на 5-координатных многозадачных станках с ЧПУ и токарных обрабатывающих центрах с приводным инструментом.

Для достижения поставленной цели требуется решить **ряд основных задач:**

1. Разработать имитационную математическую модель ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, позволяющую прогнозировать шероховатость обработанной поверхности с учетом режимов резания. Достоверность моделирования оценить лабораторными исследованиями;

2. Установить эмпирические зависимости качества обработанной поверхности от параметров обработки при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

3. Выявить зависимости величины отклонения от круглости именуемые «огранкой» от подачи режущего инструмента и подачи, формирующейся вращением заготовки при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

4. Исследовать влияние температуры в зоне резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, определить температурные зоны, позволяющие снизить критический износ инструмента;

5. Определить влияние структуры быстрорежущей стали, полученной классическим методом литья, и быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии, на ее обрабатываемость резанием;

6. Оценить эффективность использования фрезоточения в сравнении с классическим точением в технологических процессах изготовления осевого режущего инструмента;

7. Разработать технологические рекомендации по фрезоточению быстрорежущей стали для изготовления осевого режущего инструмента, направленные на достижение максимальной производительности.

Научную новизну диссертационной работы представляют следующие результаты, которые выносятся на защиту:

1. Установлено влияние структуры быстрорежущей стали, полученной классическим методом и полученной методом порошковой металлургии на обрабатываемость резанием;

2. Математическая модель зависимости шероховатости поверхности при выполнении процесса ортогонального фрезоточения на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом от режимов резания. Математическая модель, в отличие от имеющихся аналогичных моделей, содержит расчет угла запаздывания и расчет мгновенного значения толщины срезаемого слоя;

3. Установлено влияние параметров процесса ортогонального фрезоточения на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом на температуру в зоне резания, определены границы возможного повышения температуры, определены допустимые уровни температуры при обработке быстрорежущей стали;

4. Закономерности, устанавливающие влияние технологических параметров процесса ортогонального фрезоточения быстрорежущих сталей на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом, на обеспечение заданного уровня точности формы и шероховатости поверхности.

Полученные в диссертационной работе результаты можно квалифицировать как решение проблемы интенсификации черновой и получистовой обработки осевого режущего инструмента.

Теоретическая значимость работы заключается в:

1. Установлении эмпирической зависимости шероховатости и точности формы обработанной поверхности от режимов резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

2. Определении влияния режимов резания на температуру в зоне резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали и получении аналитических выражений для определения максимальных температурных полей тел, участвующих в резании;

3. Определении областей применения операции фрезоточения при изготовлении осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали в инструментальном производстве;

4. Установлении технологических параметров, позволяющих обеспечить заданный уровень точности и шероховатости при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали.

Практическая значимость работы. Установлены закономерности процессов ортогонального фрезоточения на операциях, представляющих собой комбинацию технологических переходов обработки осевого режущего

инструмента, позволяющие интенсифицировать процессы механической обработки.

Определены закономерности процессов ортогонального фрезоточения при выполнении операций, которые комбинируют технологические переходы для осевого режущего инструмента, что повышает эффективность механической обработки.

Применение ортогонального фрезоточения позволяет обеспечить заданную точность, заданное качество обработанной поверхности, снижение температуры в зоне резания, снижение технологической себестоимости осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали.

Учет влияния структуры быстрорежущей стали в зависимости от метода ее получения на ее обрабатываемость позволяет обеспечить максимальную производительность обработки.

Предложены технологические рекомендации по выбору оборудования, режущего инструмента, средств измерения, режимов резания и стратегии обработки при ортогональном фрезоточении быстрорежущей стали обеспечивающие требуемые показатели точности и качества обработки деталей в условиях инструментального производства.

Методология и методы исследования. Работа представляет собой комплекс теоретических и экспериментальных исследований, имитационного моделирования. Исследования, выполненные в рамках работы, базируются на использовании фундаментальных положений технологии машиностроения, теории резания материалов, аналитической геометрии, линейной алгебры, многофакторного планирования эксперимента.

Теоретические исследования в предметной области выполнялись с применением теории модального анализа, математического моделирования, математической статистики и теории планирования экспериментов. Для выполнения математического моделирования исследуемого процесса использовалась интерактивная среда программирования численных расчетов и визуализации результатов MATLAB2011, наилучшим образом зарекомендовавшая

себя для моделирования сложных технологических систем. Для проведения статистических расчетов и планирования эксперимента был применен пакет программного обеспечения Statistica 10.0.

Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях. Данные были получены на современном высокоточном оборудовании в ходе обработки заготовок из быстрорежущих сталей марок BÖHLER S390 MICROCLEAN, P6M5K5 и P6M5K5-МП на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом DMG NEF 400. Метрологическая обработка выходных параметров проводилась с использованием следующего измерительного оборудования:

- контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200 для измерения шероховатости обработанной поверхности;
- тепловизионная камера модели Flir Orion для измерения температуры в зоне обработки бесконтактным методом;
- оптический профилометр Bruker Contour GT-K1 для измерения погрешности формы изделия;
- динамометр Kistler 9129AA для измерения сил резания.

На защиту выносятся следующие Положения:

1. Функциональные зависимости факторов, связанных с качеством поверхности (шероховатость поверхности, «огранка», температура в зоне резания) и режимов резания для различных типов фрез (со сменными многогранными пластинами, монолитная) при ортогональном фрезоточении осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали;

2. Результаты экспериментальных исследований зависимости осевой и тангенциальной сил резания от величины подачи при обработке быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП с переменными значениями заднего угла;

3. Технологические рекомендации по определению оптимальных режимов резания, обеспечивающие заданное качество поверхности при изготовлении реальных деталей в производственных условиях.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов, полученных в рамках диссертационной работы, обуславливается выполнением работ на современном высокоточном токарном обрабатывающем центре и измерительном оборудовании с лицензионным программным обеспечением. В то же время экспериментальные исследования, проведенные автором, подтверждают теоретические подходы и математические расчеты, основанные на этих принципах.

Основные положения диссертационной работы в период с 2019 по 2023 год были представлены автором в виде докладов на 9 международных и всероссийских научно-технических конференциях. Основные положения диссертационной работы, представленные для защиты диссертации, были вынесены для обсуждения на X Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, 2020), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2021» (г. Севастополь, 2021), XI Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации)» (г. Иркутск, 2021), IV Международной конференции MIST: Aerospace – 2021 «Передовые технологии в аэрокосмической отрасли, машиностроении и автоматизации» (г. Красноярск, 2021), 6-й Дальневосточной конференции с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2022), XII Всероссийской научно-технической конференции «Жизненный цикл конструкционных материалов» (от получения до утилизации) (г. Иркутск, 2022), XVI, Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (ICIE-2023) (г. Сочи, 2022); XIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием “Жизненный цикл конструкционных материалов” (от получения до утилизации) (г. Иркутск, 2023); XVI Международной научно-

практической конференции по авиамашиностроению - International Conference on Aviation Engineering (г. Иркутск, 2023).

Публикации. По теме диссертационной работы было опубликовано 11 работ, включая 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, 2 публикации в международном издании, включенных в перечень Scopus, в которых обсуждались результаты работы и теоретические принципы. Кроме того, по тематике работы получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2023669839 (приложение Г).

Личный вклад автора. Формулировка цели и задач диссертационной работы. Была создана математическая модель, позволяющая определять микрогеометрию обработанной поверхности быстрорежущей стали при ортогональном фрезоточении. Выносимые на защиту положения, составляющие научную новизну, получены автором лично. Автор данной работы проводил экспериментальные исследования, анализировал и обрабатывал результаты, готовил материалы к публикации и сформулировал выводы и положения, которые будут вынесены на защиту. Кроме того, автор принимал непосредственное участие в разработке и совершенствовании технологий механической обработки изделий инструментального производства на Иркутском авиационном заводе - филиал ПАО «Яковлев» (ранее филиал ПАО «Корпорация «Иркут»)).

Диссертационная работа была подготовлена автором на кафедре технологии и оборудования машиностроительных производств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

Связь работы с Государственными программами и НИОКР. Представленные исследования в настоящей диссертации входят в состав работ, выполняемых в рамках проекта «Цифровые технологии производства изделий из

порошковых и труднообрабатываемых материалов» в рамках программы «Приоритет 2030».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.6. – «Технология машиностроения» в части п.2, п.3, п.4, п.9. раздела «Направление исследований» её паспорта:

- п.1. Технологичность конструкции машины, как объекта производства;
- п.2. Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости;
- п.3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения;
- п.9. Методы и средства повышения производительности изготовления изделий машиностроения.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение, список литературы и приложения. Основной раздел работы изложен на 144 страницах машинописного текста (без учета приложений и списка литературы). Общий объем составил 187 страниц, в том числе 28 таблиц и 76 рисунков, список литературы включает 123 наименования.

1 ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

Современные многозадачные станки с ЧПУ и токарные обрабатывающие центры предоставляют широкие технологические возможности и значительный потенциал для использования перспективных методов обработки деталей [105]. Эти станки имеют массовое распространение благодаря возможности выполнения множества операций обработки на одном рабочем месте: растачивание, сверление, фрезерование и измерение. Использование таких станков значительно экономит время и снижает затраты на инвестиции, кадровое обеспечение и производственную площадь.

Для современного машиностроения одной из ключевых задач является достижение максимальной эффективности работы дорогостоящих многозадачных станков с ЧПУ и токарных обрабатывающих центров, обеспечивая требуемое качество поверхности производимых деталей. Постоянно растущие требования к качеству и срокам обработки деталей побуждают изучать и разрабатывать новые способы обработки деталей. Несмотря на то что существуют разные методики, которые могут повысить эффективность механической обработки, они не получили широкого распространения по различным причинам [31, 81]. В таблице 1.1 приведены перспективные методы повышения эффективности обработки.

Таблица 1.1 – Методы повышения эффективности механообработки

Метод обработки	Наблюдаемая эффективность
Точение полигональное	В основном, полигональное точение используется для получения крепежа – квадратных и шестигранных головок болтов или гаек на автоматах продольного точения, поскольку при полигональном точении время обработки уменьшается в несколько раз, по сравнению с фрезерованием шестигранников обычным способом. К минусам данного вида обработки можно отнести узкую специализацию применения [79, 86, 99].

Продолжение таблицы 1.1

Точение ротационное	Ротационное точение имеет преимущества в виде возможности увеличения стойкости режущего инструмента благодаря постоянному обновлению режущей кромки инструмента, а также производительности из-за возможности увеличения подачи без потери качества обрабатываемой поверхности. Однако следует отметить, что этот метод имеет ряд недостатков. Во-первых, большие значения радиальной составляющей силы резания приводят к появлению больших прижимных сил по базовой посадочной поверхности отверстия в пластине. Во-вторых, нарушение плавности вращения и заклинивание режущей чашки, зачастую приводит к появлению вибраций в технологической системе. В результате может возникнуть интенсивный износ круговой режущей кромки и снизиться качество обработки поверхности [73, 82, 90].
------------------------	---

К сожалению, предлагаемые учеными новые подходы в данной области исследований, имеют ограниченное применение в инструментальном производстве.

1.1 Фрезоточение

Фрезоточение – это технология фрезерной обработки линейных и криволинейных поверхностей при одновременном вращении режущего инструмента и вращении заготовки вокруг своей оси. Обработка выполняется на симметричных или несимметричных вращающихся деталях. Она представляет собой реальную альтернативу классической токарной обработке благодаря своим преимуществам: более высокой производительности и низким температурам резания, обеспечивающих длительный срок службы инструмента. За счет прерывистых характеристик в технологии фрезоточения становится возможным поддерживать более низкие температуры резания и достигать высоких скоростей

резания. В процессе реализации технологии фрезоточения достигается максимальная интенсивность съема металла.

Фрезоточение представляет собой сравнительно новое направление в технологии машиностроения. Его практическое применение затруднено в связи с малой изученностью и отсутствием технологических рекомендаций, позволяющих использовать технологию при изготовлении серийных деталей.

Процесс фрезоточения был предметом интенсивных исследований в конце 1980-х годов, за которыми последовал ряд практических применений [9, 12]. Однако этот процесс не был исследован так широко, как другие традиционные процессы резания. Большинство исследований в данной области были направлены на изучение влияния параметров фрезоточения на качество поверхности. В первой половине XX века были сделаны первые попытки описать данную технологию обработки и найти для нее практическое применение. В 1919 году английский исследователь О'Вриен описал в руководстве для рабочих самоходный прибор для фрезеровки шестерен на токарном станке [95].

В 1946 году А.И. Кашириным было предложено обрабатывать поверхности вращения по методу «Rotomille» [83] наборами дисковых фрез, сидящих на оправках, диаметрально расположенных по обе стороны обрабатываемой детали, с осями, параллельными оси обрабатываемой заготовки. Сама заготовка устанавливается во вращающемся центре и приводится в движение приводной вилкой. В 1948 году Г.И. Грановский разработал схему обработки цилиндрической детали с помощью фрезы и описал ее кинематику. В кинематической схеме заготовка является ведущим звеном, а режущий инструмент вращается относительно заготовки. Схема предусматривает движение обеих осей вращения детали и движения фрезы по часовой стрелке и параллельно друг другу (рисунок 1.1) [76].

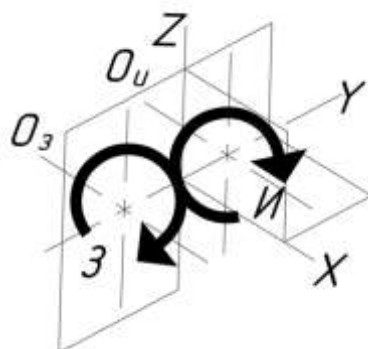


Рисунок 1.1 – Кинематика траектории относительного движения с перпендикулярными осями вращения [76]

В 1964 году А.О. Этин опубликовала описание различных методов фрезоточения, в том числе фрезерование с использованием инструмента, ось которого параллельна оси заготовки, и фрезерование цилиндрической фрезой с круговыми и тангенциальными подачами. Кроме того, она разработала схемы формирования отклонения формы типа «огранка» возникающие при фрезоточении [121].

Однако интерес к процессу фрезоточения возник вновь только в 1990 году после публикации работ Schulz и Spur, которые разделили операции фрезоточения на две группы: ортогональные и коаксиальные [51, 52]. Авторы проанализировали фрезоточение деталей роликовых подшипников, изготовленных из стали 100Cr6, являющегося отечественным аналогом стали ШХ-15 (ГОСТ 801-78), и отметили, что возможно изготовление вращательно симметричных деталей с повышенной точностью и качеством поверхности [14]. В 2012 году Степаненко А. В. исследовал точности профиля продольного сечения при фрезоточении наружных цилиндрических поверхностей [116].

Утверждается, что фрезоточение может быть использовано как для внутренней, так и для внешней обработки заготовок типа тел вращения. В данном процессе вращательные движения инструмента и обрабатываемой детали обеспечивают высокую скорость резания, высокое качество поверхности и низкие силы резания. Коаксиальное фрезоточение также может применяться для

внутренней и внешней обработки, в то время как ортогональное и тангенциальное может использоваться только для внешней обработки.

В связи с изложенным, правомерными являются изыскания, имеющие целью заменить традиционный процесс токарной обработки фрезоточением. Подобные попытки имели место и раньше. Машиностроительными предприятиями, в том числе иностранными, проводились работы по использованию для обработки деталей типа тело вращения процесса фрезерования набором дисковых фрез (способ «Rotomille») [78].

В то время, когда Schulz исследовал только ортогональные и коаксиальные операции фрезоточения, современные исследования сосредоточены на ортогональных и тангенциальных процессах [50]. Эти новые методы обработки могут быть использованы для достижения еще более высоких показателей скорости, качества и эффективности.

В статье Choudhury и Vajrai [11] были проведены исследования ортогонального фрезоточения и стандартной токарной обработки в ходе сравнения шероховатости поверхностей, получаемых после применения каждого из перечисленных методов. Исследователи отметили, что использование фрезоточения может улучшить качество поверхности в 10 раз по сравнению со стандартной токарной обработкой. Они также отметили, что существуют оптимальные значения частоты вращения заготовки, позволяющие повысить технологичность обработки при применении данного метода. Помимо прочего, в работе Choudhury и его коллег [11] был изучен процесс образования микрорельефа поверхности, получаемый при ортогональном фрезоточении, а также представлены результаты моделирования его формирования.

С другой стороны, Zhu и его коллеги представили модель, которая позволяет прогнозировать шероховатость поверхности, полученную в процессе фрезоточения с ортогональным поворотом. Результаты данного исследования, адекватность моделирования подтверждена экспериментально [65, 66, 67]. Filho разработал модель резания для врезного ортогонального фрезоточения, в которой были предложены коэффициенты сил резания для построения модели [17].

Karagüzel и его коллеги использовали аналитическую модель, в которой коэффициенты резания были оценены из ортогональной базы данных, чтобы предсказывать силы резания для ортогонального фрезоточения. Они также определили отношение скорости обработки к качеству обработанной поверхности и предложили метод выбора параметров резания для повышения производительности [19].

Для моделирования силы неэксцентрического ортогонального фрезоточения Qiu и соавторы [44, 45] скорректировали коэффициенты резания при помощи врезного фрезерования. В ходе исследования ими были рассчитаны коэффициенты сил резания для боковой и торцевой кромок фрезы, которые в дальнейшем были использованы при моделировании сил резания.

Yan и его коллеги провели исследование на тему стабильности при фрезерной обработке с ортогональным поворотом. Они предложили новую модель, которая учитывает влияние переменной ширины резания и толщины стружки на процесс обработки. Эта модель позволяет добиться повышения качества обработки поверхностей и повысить стабильность работы станков при фрезеровании. Кроме того, результаты исследования могут быть использованы для улучшения производительности и снижения расходов на производство [61].

Исследования, проведенные Savas, Ozay, Ratnam и соавторами, показали, что тангенциальное фрезоточение может обеспечить высокое качество поверхности, сравнимое со шлифованной поверхностью [39, 48]. Neagu и соавторы занимались изучением кинематики ортогонального фрезоточения, рассматривали отклонения от круглости, скорость резания и геометрию инструмента [35]. Filho изучал силы резания при ортогональном фрезоточении на пятиосевом токарном обрабатывающем центре [17]. Zenghui представил результат моделирования поверхности заготовки, полученной в процессе тангенциального фрезоточения на основе программного комплекса Matlab [63]. Karaguzel, Bakkal и Budak провели исследование механики и тепловых аспектов процесса фрезоточения, а также разработали модели для проверки геометрии процесса,

кинематики, динамики и качества обработки деталей при ортогональном и тангенциальном фрезоточении [24].

Температура резания является важным фактором в процессах обработки, т.к. она влияет на срок службы инструмента, целостность поверхности заготовки, механизм образования стружки и термическую деформацию инструмента [1, 53]. Сравнение способов обработки между классическим фрезерованием и фрезоточением показывает, что при фрезоточении большее количество тепла уходит в инструмент, чем при фрезеровании [97].

Контроль температуры резания с применением возможностей систем моделирования является важным фактором в области прерывистого резания, и несколько исследований посвящены изучению температуры резания в этом процессе [21]. Однако, в отличие от непрерывного резания, прерывистое резание включает в себя циклы нагрева и охлаждения, которые могут вызвать термические усталостные трещины на режущем инструменте [9, 20, 54]. Тепло, выделяющееся при резании в процессе фрезоточения, распределяется между заготовкой, инструментом и стружкой. Кроме того, периодическая смена рабочих циклов каждого зуба фрезы также способствует более эффективному отводу тепла. Для процесса ортогонального фрезоточения, Peng предложил модель определения температуры заготовки, которую он затем проверил, проведя измерения при помощи термопары [41]. Тем не менее существует еще много пробелов в этой области, и исследования, проведенные Karaguzel и его коллективом [22], показали, что увеличение скорости резания и ширины резания приводит к увеличению температуры резания. Следует отметить также отечественный опыт исследования фрезоточения следующими исследователями: Блохин Д.А., Грязев М.В., Селиванов А.Н., Степаненко А.В. [7, 77, 107, 117].

Отечественным исследователем Степаненко А.В. предложены фрезы специальной конструкции (рисунок 1.2), предназначенные для применения на модернизированном горизонтально-фрезерном станке 6Р83Г, используемые для обработки поверхностей валков прокатных станов, бандажей и цельнокатаных колес железнодорожного состава и других деталей больших диаметров [117].

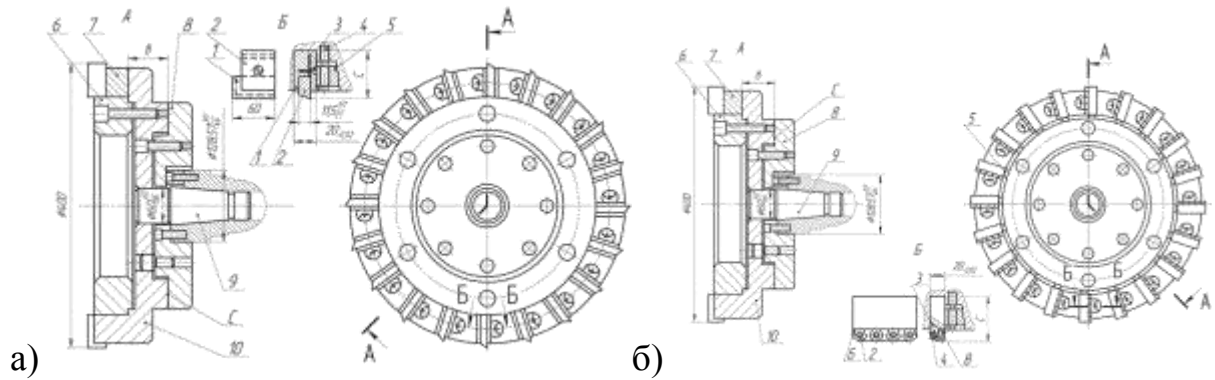


Рисунок 1.2 – Фрезы перспективной конструкции Степаненко А.В.:
 а) – фреза для касательного фрезерования; б) – фреза с многорядным расположением зубьев [117]

Фреза для касательного фрезерования (рисунок 1.3а) представляет собой сборную конструкцию с отдельными взаимозаменяемыми блоками, оснащенными твердосплавными пластинами. Фреза с многорядным расположением зубьев (рисунок 1.3б) отличается от предыдущей конструкцией резцового блока [117].

Также производились исследования формообразования резьбы фрезоточения следующими исследователями: Куликов М.Ю., Лашнев С.И., Ямников А.С., Ямникова О.А., Солянкин Д.Ю. [29, 60, 85, 87, 115, 122, 123]. Обработка резьбы производится фрезами специальной конструкции, в частности дисковой [85, 115] и винтовой [60] конструкций (рисунок 1.3).

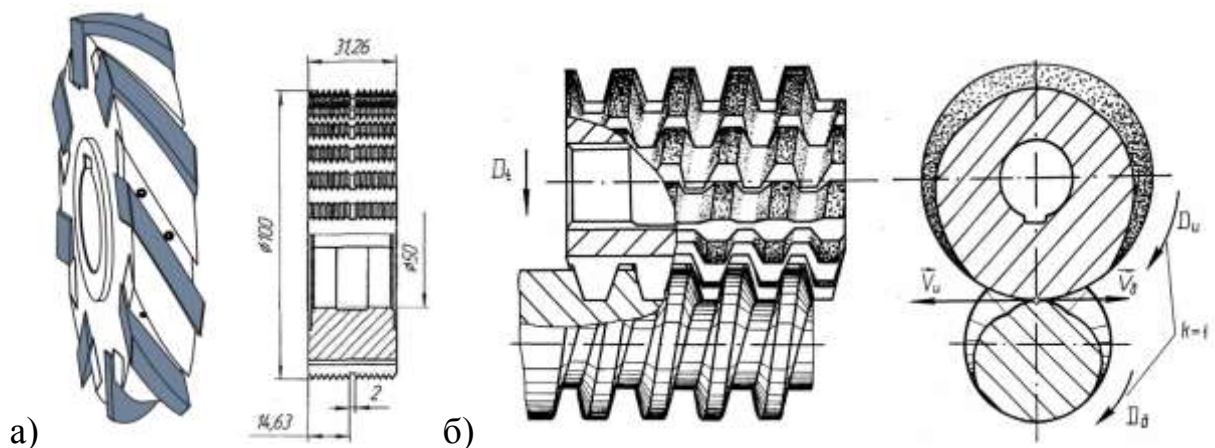


Рисунок 1.3 – Эскиз перспективного инструмента для фрезоточения резьбы:
 а) – дисковый [85, 115]; б) – винтовой [60]

Из анализа публикаций [14, 17, 19, 24, 35, 51, 63], видно, что использование методов математического моделирования является экономически целесообразным для улучшения эффективности процесса обработки.

В целом усилиями отечественных и зарубежных исследователей изучена обработка фрезоточением традиционных конструкционных сталей [8, 16, 50], а также цветных сплавов [30, 47, 62, 65]. Однако возможности использования фрезоточения для повышения производительности обработки быстрорежущей стали, полученной литьем или методом порошковой металлургии, применяемых в инструментальном производстве, остаются вне области исследований российских и зарубежных авторов. Это создает некоторые ограничения в применении фрезоточения для изготовления осевых режущих инструментов [37]. Несмотря на это, использование данного метода может дать наибольший экономический эффект в области механообработки.

Применение данного способа обработки представляет особый интерес для инструментального производства в процессе обработки быстрорежущих сталей для производства осевых режущих инструментов.

Необходимо отметить, что при проведении экспериментов в рамках исследований используются многозадачные станки, но также возможно применение фрезерования на токарных обрабатывающих центрах с приводным инструментом. Для более точных результатов исследования необходимо проводить контроль температуры в зоне резания и измерять остаточные напряжения в материале до и после фрезерования [10, 23, 109].

1.2 Кинематические схемы фрезоточения

Анализ кинематических схем обработки цилиндрических поверхностей тел вращения методом фрезоточения позволил выделить следующие:

- ортогональное фрезоточение (рисунок 1.4);
- тангенциальное фрезоточение (рисунок 1.6);
- коаксиальное фрезоточение (рисунок 1.9).

Так как пятно контакта фрезы с заготовкой для каждой из схем представленных выше будет отличаться, в данной работе предлагаю использовать следующие обозначения ширины резания:

- $B_{ос}$ осевая ширина резания;
- $B_б$ боковая ширина резания;
- $B_р$ радиальная ширина резания.

1.2.1 Ортогональное фрезоточение

В то время как фреза установлена в высокоскоростном приводном блоке, заготовка зажимается во вращающемся патроне, который вращается с меньшей скоростью, чем шпиндель с инструментом (рисунок 1.4). Для выполнения процесса резания необходимо осуществлять движение режущего инструмента вдоль оси вращения заготовки, чтобы создать движение продольной подачи S_z . При этом скорость резания v будет зависеть от частоты вращения заготовки $n_{заг}$ и инструмента $n_{и}$. Осевая ширина резания $B_{ос}$ регулируется величиной перемещения фрезы в осевом направлении.

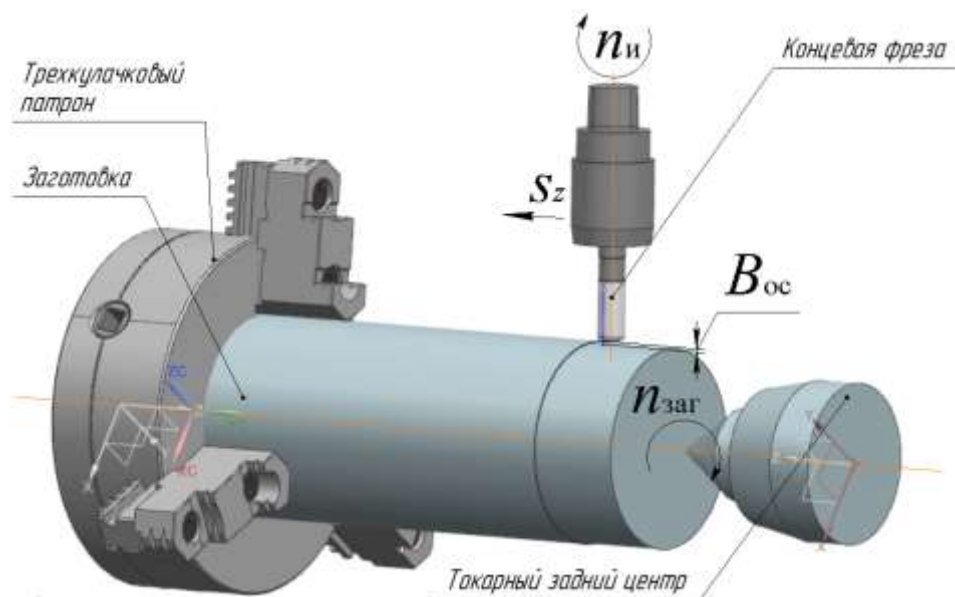


Рисунок 1.4 – Визуализация операции ортогонального фрезоточения

Процесс ортогонального фрезоточения приводит к образованию стружки в результате действия боковой и торцевой частей режущего инструмента [25].

Схема припуска, возникающего в результате этого процесса, представлена на рисунке 1.5.

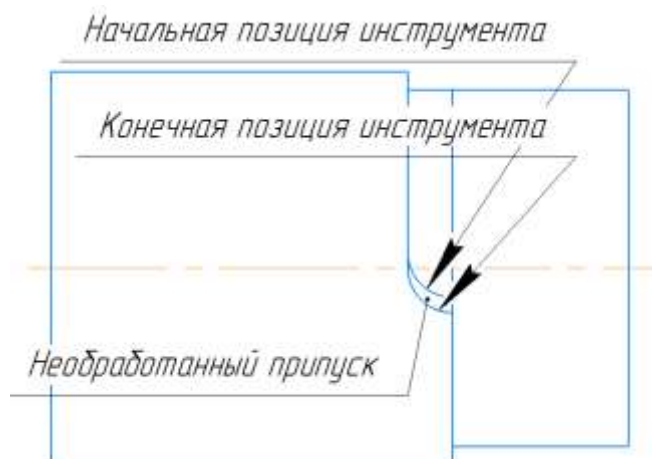


Рисунок 1.5 – Припуск после ортогонального фрезоточения

Важным этапом моделирования силы резания является определение припуска [38, 46, 92, 114]. Чтобы определить толщину припуска, остающуюся при выходе фрезы из контакта с заготовкой необходимо определить начальное и конечное положение инструмента [35]. Для достижения полного удаления материала требуется проанализировать геометрию инструмента и скорректировать траекторию обработки на основе полученных данных.

1.2.2 Тангенциальное фрезоточение

На рисунке 1.7 изображена схема операции тангенциального фрезоточения. При использовании этой технологии стружка образуется на режущей кромке образующей инструментальной поверхности и стыке бокового и торцевого зуба режущего инструмента, как показано на рисунке 1.6, а не на торцевой части фрезы, как это происходит в случае ортогональной обработки.

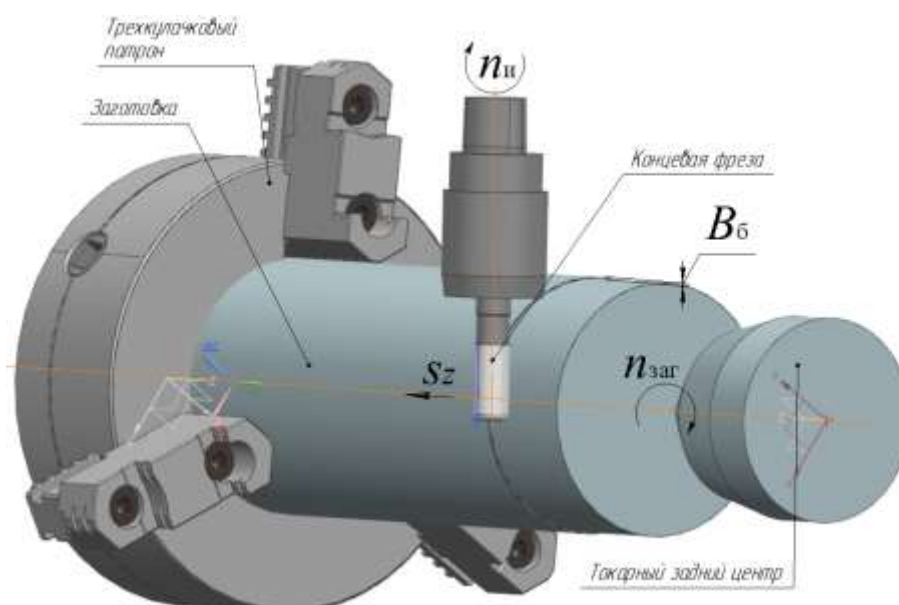


Рисунок 1.6 – Визуализация операции тангенциального фрезоточения

Для определения необработанного припуска можно использовать аналогичные методы, как и в случае ортогональной обработки (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Необработанный припуск после тангенциального фрезоточения

В случае тангенциального фрезоточения происходит радиальное формирование шероховатости поверхности (рисунок 1.8) [119]:

$$y = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - S_z^2} \right), \quad (1.1)$$

где D – диаметр фрезы, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

l – базовая длина рельефной поверхности, мм;

y – высота профиля рельефной поверхности, мм.

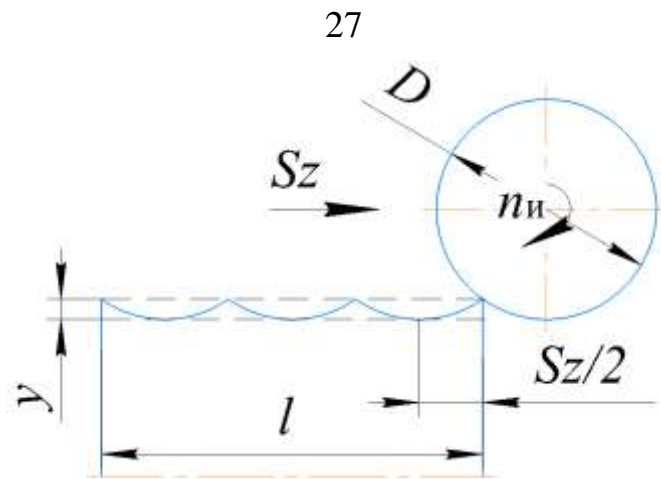


Рисунок 1.8 – Схема радиального формирования поверхности концевой фрезой [119]

1.2.3 Коаксиальное фрезоточение

Коаксиальное фрезоточение в основном подходит для внутренней и внешней обработки заготовки с длиной обработки ограниченной вылетом инструмента. На рисунке 1.9 приведен пример внешнего (1.9а) и внутреннего (1.9б) коаксиального фрезоточения.

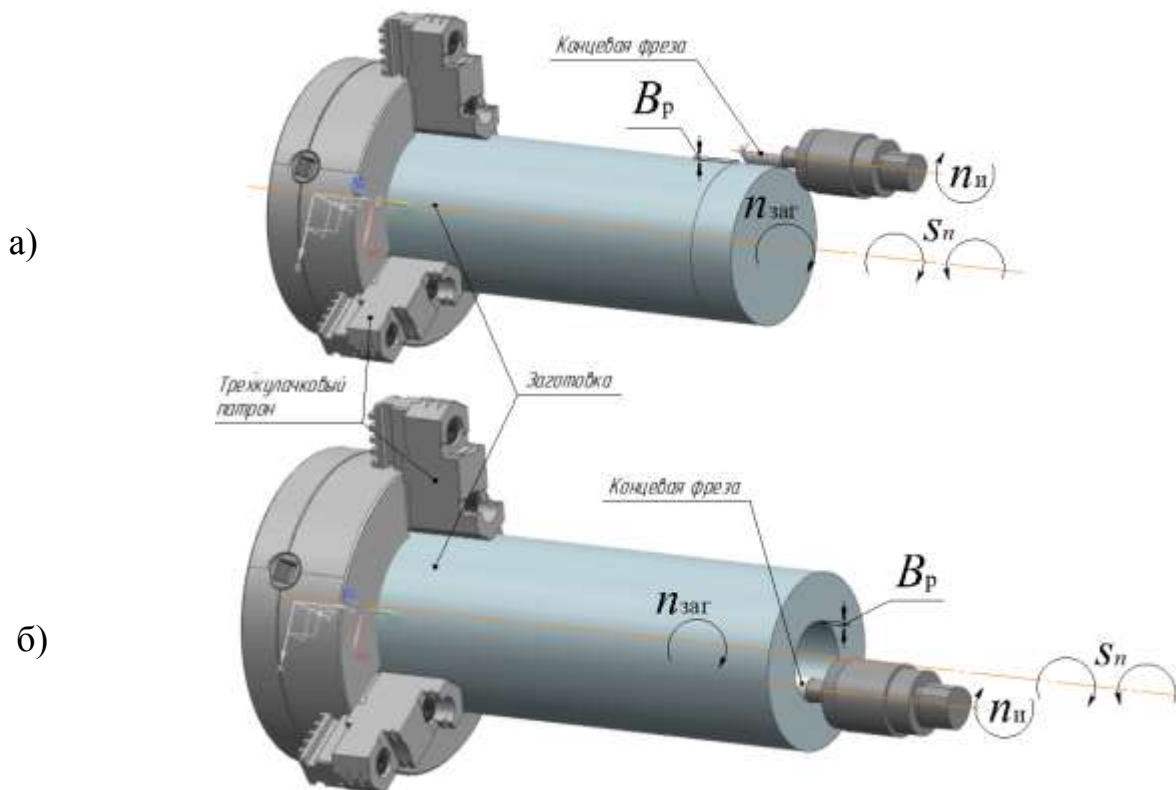


Рисунок 1.9 – Визуализация операции коаксиального фрезоточения:

а) – наружное; б) – внутреннее

При коаксиальном фрезеровании фреза и заготовка вращаются как в одном, так и в различных направлениях, что в первом случае обеспечивает более равномерное снятие материала и снижает вероятность появления вибраций.

Как следует из теоретических и экспериментальных данных, приведенных в работе [51], качество поверхности, геометрическая форма и точность, полученные при коаксиальном фрезоточении, хорошо конкурируют с обычными процессами тонкой и точной обработки, такими как шлифование, развертывание или хонингование.

Длина стружки зависит от соотношения между скоростями вращения инструмента и обрабатываемой детали. Толщина стружки зависит только от скорости радиальной подачи.

Область применения данного вида обработки ограничена вылетом фрезы, от которой зависит максимальная длина обработки, что позволяет распространять этот метод обработки на изготовление колец, втулок, зубчатых колес и им подобным. Способ обработки, когда сочетаются два вращательных движения по часовой стрелке с взаимно параллельными осями, известен уже давно, но мало изучен и на практике применяется крайне редко [78].

Предшественником коаксиальному методу обработки послужил способ фрезерования набором дисковых фрез (способ Rotomille) [78], схема которого представлена на рисунке 1.10.

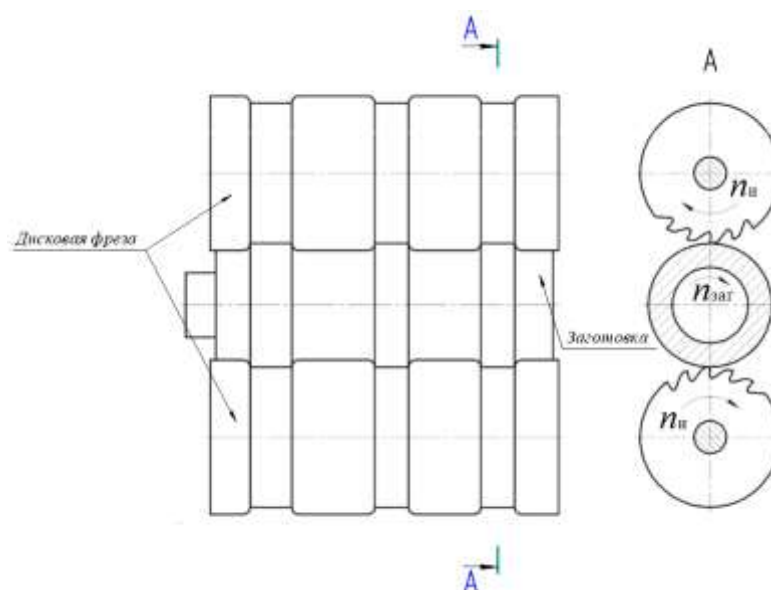


Рисунок 1.10 – Визуализация операции Rotomille [78]

Преимуществом этого процесса является возможность получить наружный контур полностью, за одну операцию, выполняемую за одну установку. Существенными недостатками является трудность изготовления, эксплуатации и переточки инструмента. В известных литературных источниках не поясняется, вследствие каких причин метод Rotomille не получил практического распространения.

Из анализа работ следует, что кинематические характеристики процесса определяются различными методами, исходя из наибольшего расстояния между траекториями двух соседних режущих кромок в пределах кривой контакта.

Фрезоточение обеспечивает следующие преимущества:

1. Возможность обработки сложных деталей за одну установку с одновременным расширением возможности станков (токарно-фрезерных, фрезерных с поворотной осью, а также многих других), увеличение номенклатуры выпускаемых деталей, повышение экономической эффективности производства;
2. Уменьшение вылета инструмента;
3. Низкий крутящий момент резания за счет небольшого диаметра инструмента;
4. Возможность проведения профильной обработки;
5. Сокращение количества переходов и инструмента.

Несмотря на ряд преимуществ, в методе фрезоточения присутствуют некоторые недостатки:

1. Невозможность обработки глубоких отверстий;
2. Зависимость качества поверхности от соотношения скоростей вращения заготовки и инструмента. Это соотношение оказывает значительное влияние на форму поперечного сечения заготовки, которая приближается к идеальной при больших соотношениях частоты вращения заготовки и частоты вращения инструмента.
3. Сложность моделирования динамики резания, в связи с одновременным вращением заготовки и режущего инструмента.

4. Рост шероховатости обработанной поверхности при увеличении глубины резания t (при ортогональном фрезоточении).

По результатам библиографического обзора об актуальности выбранного направления исследования сделаны следующие выводы:

– на рынке инструментальных материалов доступны как обычные быстрорежущие стали, так и стали тех же марок, полученные порошковым методом;

– отсутствуют рекомендации об учете структуры материала при разработке технологических процессов механообработки изделий из быстрорежущей стали [5, 34]. Что приводит к тому, что механообработка будет вестись на заниженных режимах резания, что, в свою очередь, приведет к увеличению технологической себестоимости изделия.

1.3 Анализ особенностей быстрорежущих сталей

Быстрорежущая сталь является распространенным материалом для изготовления осевых режущих инструментов, таких как фрезы, сверла, зенкеры, метчики и т.п. В последнее время наблюдается возросший интерес со стороны производителей инструмента к быстрорежущей стали, который обусловлен развитием порошковой металлургии [26]. Использование порошковой технологии открывает перспективу разработки универсальных порошковых инструментальных сталей с высоким содержанием углерода и недорогих легирующих элементов, таких как ванадий и хром, для изготовления режущего инструмента, работающего со значительными динамическими и тепловыми нагрузками [28]. Режущие инструменты, изготовленные из быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии обладают лучшими потребительскими свойствами. Порошковая быстрорежущая сталь содержит карбиды, которые равномерно распределяются в структуре металла. За счет них обеспечиваются отменные прочностные свойства материала и высокая износостойкость. Например, по данным исследователей, стойкость инструмента из порошковой быстрорежущей стали может возрастать до шести раз по

сравнению со стойкостью инструментов, изготовленных из быстрорежущей стали, полученной классическим методом [74, 75]. Такие результаты обеспечиваются мелкодисперсной карбидной структурой порошковых материалов. На рисунке 1.11 представлены характерные изображения микроструктур быстрорежущих сталей, из которых в настоящее время осуществляется изготовление осевого режущего инструмента в промышленных масштабах.

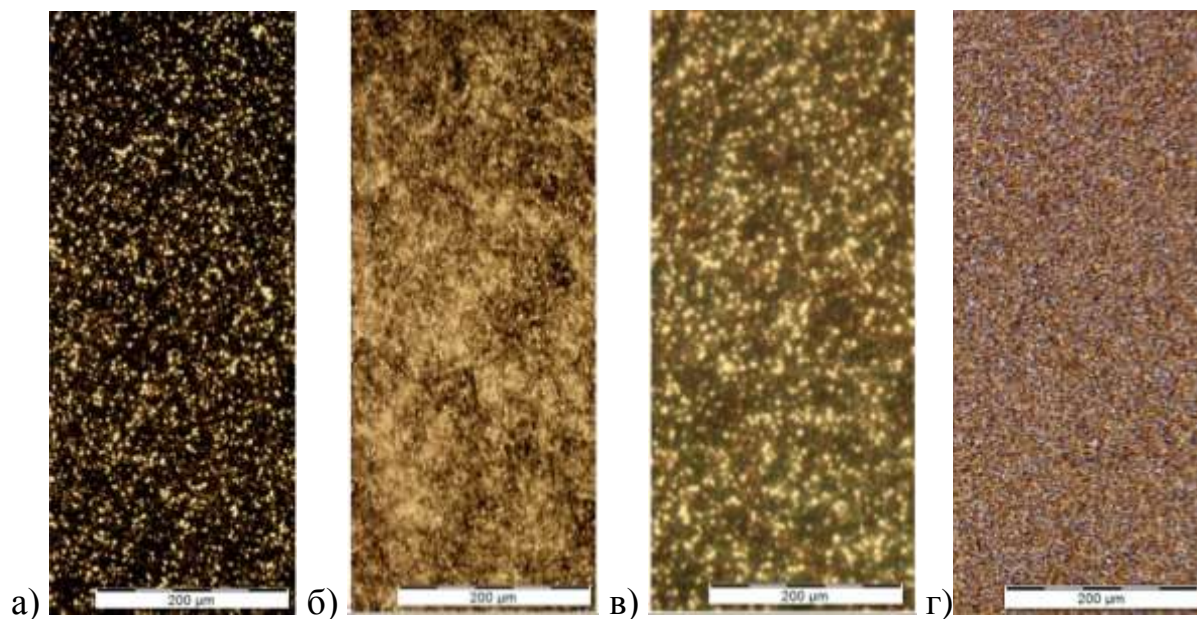


Рисунок 1.11 – Микроструктуры быстрорежущих сталей:

- а) – P6M5K5-МП после термообработки; б) – P6M5K5-МП на хвостовике инструмента; в) – P6M5K5-МП после полного цикла термической обработки; г) – Böhler S390 полученный методом горячего изостатического прессования после термообработки (закалки и трехкратного отпуска)

Инструментальный рынок в мире развивается, и одним из ключевых направлений этого развития является совершенствование структуры инструментальных материалов и методов их изготовления. Среди основных тенденций в развитии материалов для инструментального производства можно выделить следующее:

1. Узкая специализация материалов в зависимости от их назначения и условий обработки, группировка в соответствии с классификацией ISO;

2. Разработка новых инструментальных сталей и сплавов специально для высокопроизводительной механообработки;

3. Совершенствование технологии производства порошковых быстрорежущих сталей.

Разнообразие материалов и методов производства позволяет существенно улучшить качество и эффективность инструментов для механической обработки, а также привести к росту производительности обрабатываемых станков. В дальнейшем, с развитием науки и технологий, можно ожидать еще более продвинутых материалов и методов их изготовления, что позволит достигать успехов в сфере механической обработки.

В производстве режущего инструмента помимо его конструкции и размеров большую роль играет стоимость его производства. Производители стараются снизить затраты на производство, чтобы сделать свою продукцию более конкурентоспособной на рынке. Для снижения затрат на производство режущего инструмента из быстрорежущих сталей используют прогрессивные технологии механической обработки [93, 104].

При внедрении новых технологий в производстве режущего инструмента особенно важен вопрос об обрабатываемости быстрорежущих сталей. Если быстрорежущие стали, произведенные традиционным способом, уже давно используются в инструментальном производстве, и имеется богатый опыт по их обработке, то с порошковыми быстрорежущими сталями дело обстоит совершенно иначе. На данный момент практически отсутствует информация о том, как обрабатываются порошковые быстрорежущие стали и как их структура влияет на обрабатываемость материала. Это означает, что ученые и производители инструментов должны приложить значительные усилия для изучения этого вопроса и разработки инновационных решений, повышающих эффективность процесса механической обработки порошковых быстрорежущих сталей.

Быстрорежущие стали по-прежнему остаются одним из основных материалов в производстве режущего инструмента. Их преимущества включают

хорошее сочетание механических и технологических свойств, благодаря чему они занимают промежуточное положение между нетеплостойкими легированными сталями и твердыми сплавами. Тем не менее с развитием инновационных технологий и появлением новых материалов, становится все более важным вопрос об обрабатываемости быстрорежущих сталей. Существующий опыт, полученный при обработке традиционных быстрорежущих сталей, не может быть применен к порошковым быстрорежущим сталям из-за отсутствия проведенных исследований в этой области. Это подчеркивает необходимость дополнительных исследований и разработок в области новых технологий обработки, учитывающих особенности порошковых быстрорежущих сталей в целях повышения их обрабатываемости в производстве режущего инструмента.

Быстрорежущие стали способны работать в сложных условиях резания, благодаря теплостойкости, так как их режущие кромки могут нагреваться до 600..650°С. Кроме того, они обладают преимуществами в технологических свойствах по сравнению с твердыми сплавами. Данное свойство позволяет производить металлорежущие осевые инструменты разной конструкции и широкого ассортимента из этих материалов, например: сверла, метчики, развертки, фрезы, протяжки и другие. Эти инструменты имеют особенности в виде фасонно-зубчатой формы поперечного сечения рабочей части, фасонных винтовых поверхностей в продольном направлении, поверхностей специальных форм (которые формируют режущие кромки), а также поверхностей, созданных с помощью спирали Архимеда, логарифмической спирали, эвольвент и других кривых. Наличие таких поверхностей и в особенности их сочетание в одном инструменте определяли в прошлом необходимость применения специальных станков: затыловочных, специальных зубошлифовальных, резьбошлифовальных и заточных станков.

Для обработки быстрорежущей стали требуются специальные методы и режимы в связи с ее низкой обрабатываемостью. Однако современное высокопроизводительное оборудование с ЧПУ, в особенности многозадачные станки и токарные обрабатывающие центры с приводным инструментом,

позволяют реализовать эти методы и режимы. Это позволяет осуществлять обработку быстрорежущей стали с высокой точностью и скоростью, что повышает эффективность производства. Важно отметить, что такое оборудование требует квалифицированных специалистов, которые могут правильно настроить и использовать его для достижения наилучших результатов.

Качество инструментов зависит не только от точности геометрических форм и шероховатости поверхностей, но также от физико-механических характеристик (например, отсутствия обезуглероженного или вторичного закаленного слоя, структуры, наличия остаточных напряжений и других факторов)[36]. Для достижения наилучшего качества изготовления инструментов необходимо применять специальные методы контроля исходных материалов [94], а также методы и режимы механической, термической и термохимической обработки, а также оптимизировать технологический процесс изготовления инструмента.

Быстрорежущие стали отечественного производства (ГОСТ 19265-73) по свойствам подразделяют на две основные группы:

1. Стали умеренной теплостойкости для режущего инструмента нормальной производительности для обработки углеродистых и низколегированных сталей перлитного класса – P6M5, P6M3, P8M3, P18, P12, P9;
2. Стали повышенной теплостойкости для режущего инструмента повышенной производительности с повышенным содержанием кобальта – P6M5K5, P9K5, P9M4K8, P2M9K5, P8M8K6C.

Изготавливаемый отечественный металлообрабатывающий инструмент из быстрорежущих сталей не всегда является конкурентоспособным по сравнению с продукцией зарубежных производителей из-за ряда объективных факторов.

Это может быть связано с отсутствием комплексного контроля качества сталей в состоянии поставки и после упрочняющей термической обработки (в соответствии с ГОСТ 19265-73), а также с недостатками в термической обработке инструмента. Оборудование, используемое для термической обработки, может быть устаревшим и не обеспечивать заданные производителем узкие

температурные диапазоны режимов термообработки. В России имеется опыт производства осевого режущего инструмента из импортных быстрорежущих сталей, что подтверждается данными из источников [37, 74, 104], проведенных в этой области исследований.

Зарубежные производители [6, 59] предоставляют широкий выбор порошковых быстрорежущих сталей, являющихся аналогами отечественных сталей по ГОСТ 19265-73. В настоящее время прослеживается все большая необходимость в производстве и использовании быстрорежущих сталей повышенной теплостойкости, в частности, порошковых инструментальных сталей, что обусловлено использованием высокопроизводительных станков с ЧПУ. В таблице 1.2 представлены сведения об основных технологических свойствах быстрорежущих сталей.

Таблица 1.2 – Технологические свойства быстрорежущих сталей [91]

Марка стали	Технологические свойства				
	Прочность на сжатие	Шлифуемость	Прокаливаемость	Вязкость	Износостойкость
ASP 2005 (1.3377)	4/5	4/5	2/5	4/5	3/5
ASP 2011	3/5	2/5	3/5	3/5	4/5
ASP 2017 (1.3288)	5/5	4/5	3/5	2/5	2/5
ASP 2055	5/5	2/5	4/5	2/5	3/5
ASP 2060 (1.3292)	2/5	2/5	5/5	2/5	5/5
Böhler S200 (1.3355)	3/5	2/5	3/5	2/5	3/5
Böhler S390 (1.3202)	4/5	2/5	3/5	4/5	4/5
Böhler S500 (1.3247)	4/5	3/5	4/5	2/5	2/5
Böhler S600 (1.3343)	3/5	3/5	3/5	3/5	2/5
Böhler S705 (1.3243)	4/5	3/5	3/5	3/5	2/5
Böhler S730 (1.3230)	3/5	3/5	2/5	3/5	2/5

Продолжение таблицы 1.2

P6M3	3/5	1/5	3/5	3/5	3/5
P6M5	3/5	3/5	3/5	1/5	3/5
P6M5K5	3/5	4/5	3/5	4/5	5/5
P6M5K5-МП	3/5	4/5	3/5	4/5	5/5
P9	3/5	1/5	3/5	2/5	3/5
P9M4K8	3/5	1/5	3/5	1/5	5/5
P12Ф3	3/5	5/5	3/5	3/5	3/5

Химический состав порошковых быстрорежущих сталей близок к составу обычных быстрорежущих сталей, но содержит больше углерода, карбидообразующих элементов, особенно ванадия и кобальта. Классическим методом литья многие марки порошковых сталей невозможно изготовить, поскольку они не поддаются ковке и шлифовке.

В России существует как теоретический, так и практический опыт в области изготовления порошковых быстрорежущих сталей [84]. В частности, в стране существуют предприятия, которые производят порошки сплавов с помощью газоструйного распыления, включая быстрорежущие стали - например, АО «ПОЛЕМА» [96]. Кроме того, имеются предприятия, которые используют технологии изостатического прессования и экструзии [40].

Применение порошковой технологии при изготовлении быстрорежущих сталей значительно улучшает их основные и технологические свойства, а также открывает перспективы для создания новых материалов для высокопроизводительной механической обработки. Использование быстрорежущих сталей, полученных по технологии порошковой металлургии, дает возможность значительно увеличить стойкость инструмента [69, 112]. Следует иметь в виду, что хотя новые материалы и обладают улучшенными технологическими свойствами, их относительно низкая обрабатываемость резанием является сдерживающим фактором в их применении, который необходимо учитывать [68].

Химический состав быстрорежущих сталей приведен в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Химический состав быстрорежущих сталей [91]

Марка стали	Массовая доля элемента не более, %												
	С (углерод)	Si (кремний)	Mn (марганец)	Ni (никель)	P (фосфор)	Cr (хром)	Mo (молибден)	W (вольфрам)	V (ванадий)	Co (кобальт)	S (серы)	Cu (медь)	N (азот)
ASP 2005	1,55	0,6	0,4	–	0,03	4,5	2,8	2,8	4,2	–	0,03	–	–
ASP 2011	2,45	–	–	–	–	5,25	1,3	–	9,75	–	–	–	–
ASP 2017	0,85	0,6	0,4	–	0,05	4,5	3,3	3,3	1,2	8,5	0,03	–	–
ASP 2055	1,69	–	–	–	–	4	4,6	6,3	3,2	9	–	–	–
ASP 2060	2,4	0,7	0,4	–	0,05	4,5	7,3	7,3	6,7	11	0,03	–	–
Böhler S200	0,75	0,25	0,3	–	–	4,1	–	18	1,1	–	–	–	–
Böhler S390	1,6	0,6	0,3	–	0,02	4,8	2	10,4	4,8	8	0,02	–	–
Böhler S500	1,1	0,5	0,25	–	–	3,9	9,2	1,4	1,2	8	–	–	–
Böhler S600	0,89	–	–	–	–	4,1	5	6,2	1,8	–	–	–	–
Böhler S705	0,92	–	–	–	–	4,1	5	6,2	1,9	4,8	–	–	–
Böhler S730	0,92	–	–	–	–	4,1	4,25	1,95	4,15	4,75	–	–	–

Продолжение таблицы 1.3

P6M3	0,95	0,05	0,4	0,4	0,03	3,6	3,6	6,5	2,5	0,5	0,03	–	–
P6M5	0,9	0,5	0,5	0,4	0,03	4,4	5,3	6,5	2,1	0,5	0,25	–	–
P6M5K5	0,92	0,5	0,5	0,6	0,03	4,3	5,3	6,7	2,1	5,2	0,03	0,25	–
P6M5K5 - МП	1,09	0,6	0,5	0,4	0,03	4,3	5,3	7,0	2,1	5,3	0,03	0,25	0,06
P9	0,95	0,5	0,5	0,4	0,03	4,4	1	9,5	2,7	0,5	0,03	–	–
P9M4K8	1,1	0,5	0,5	0,4	0,03	3,6	4,3	9,5	2,7	8,5	0,03	–	–
P12Ф3	1,05	0,5	0,5	0,4	0,03	4,3	1	13	3	0,5	0,03	–	–

Данные материалы получили наибольшее распространение для изготовления режущих инструментов, благодаря высокой шлифуемости, жесткости и стабильности кромки.

1.4 Конструктивные особенности изделий, изготавливаемых из быстрорежущих сталей

В качестве инструментов, являющихся объектами исследований диссертационной работы, были выбраны типовые изделия инструментального производства, крайне востребованные предприятиями машиностроения и оборонно-промышленным комплексом.

Типовыми изделиями из быстрорежущей стали являются: концевые фрезы, сверла, зенкеры, развертки, протяжки и т.д. (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Типовые изделия из быстрорежущей стали

Типовыми конструктивными элементами изделия являются: направляющая часть, режущая (рабочая) часть, шейка инструмента и хвостовик. В зависимости от назначения инструмента, конструктивные элементы могут иметь вид:

- режущая часть: цилиндрическая, угловая, комбинированная, фасонная (рисунок 1.13);
- направляющая: переднее, заднее, комбинированное (рисунок 1.14);
- шейка: цилиндрическая, угловая (рисунок 1.15);
- хвостовик: квадрат; цилиндрический, конический, Weldon (рисунок 1.16).

Более подробно конструкция инструмента рассмотрена ниже:

На рисунке 1.13 представлены: фреза концевая – 1.13а и сверло спиральное с цилиндрической режущей частью – 1.13б; зенкер с фасонной режущей частью – 1.13в; зенкер – 1.13г и фреза концевая с конической режущей частью – 1.13д; сверло-зенкер с комбинированной режущей частью – 1.13е.

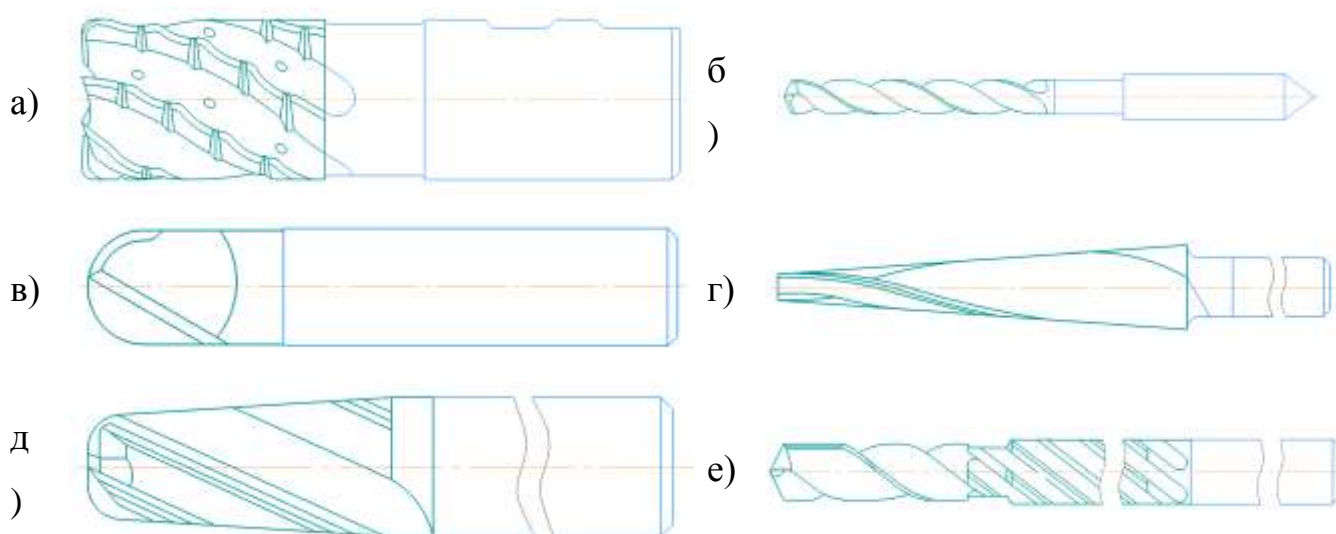


Рисунок 1.13 – Конструкция режущей части инструмента

На рисунке 1.14 представлены: зенкер – 1.14а и развертка с передним направлением – 1.14б; развертка – 1.14в и зенкер с передним и задним направлениями – 1.14г.

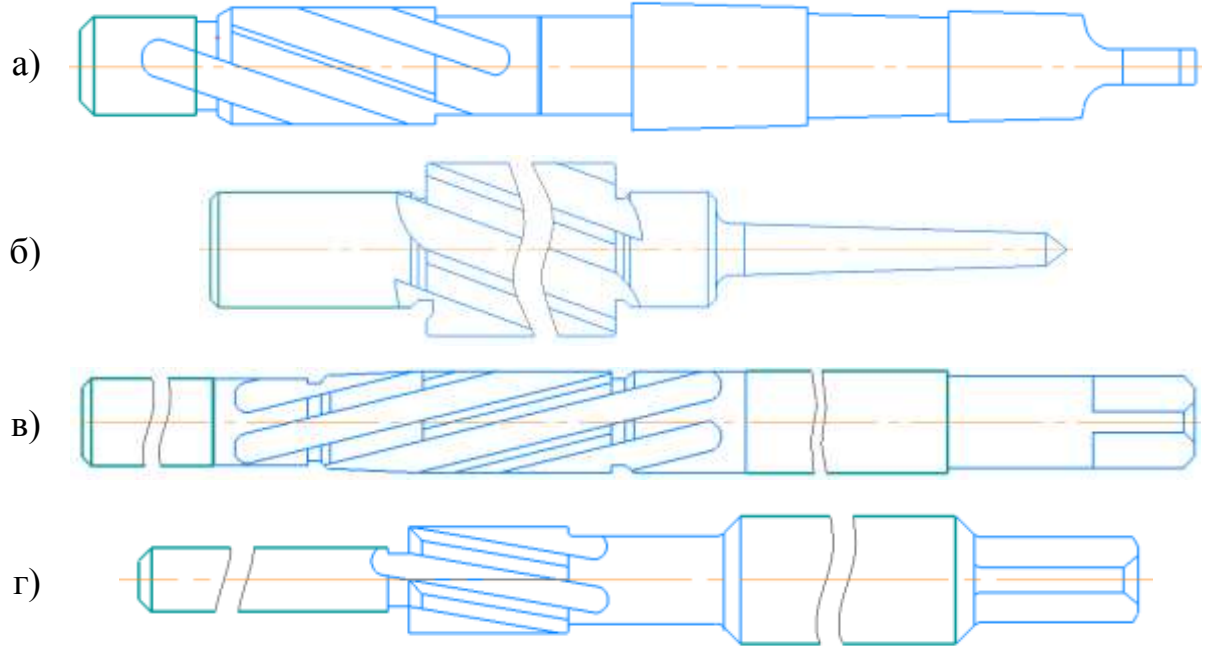


Рисунок 1.14 – Конструкция направляющих инструмента

На рисунке 1.15 представлены конструкции шейки инструмента.

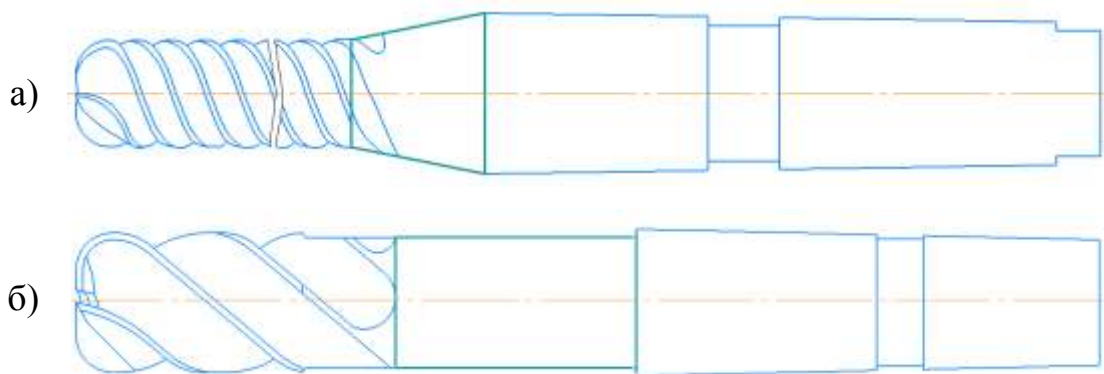


Рисунок 1.15 – Конструкция шейки инструмента:

а) – цилиндрическая; б) – коническая

На рисунке 1.16 представлены: развертка – 1.16а и зенкер с квадратом на хвостовике – 1.16б; борфреза – 1.16в и фреза с цилиндрическим хвостовиком – 1.16е; зенкер – 1.16г и развертка с конической режущей частью – 1.16д; фреза концевая с угловой режущей частью – 1.16д; фреза – 1.16ж; развертка – 1.16з, фреза с коническим хвостовиком – 1.16и; фреза с хвостовиком типа Weldon – 1.16к.

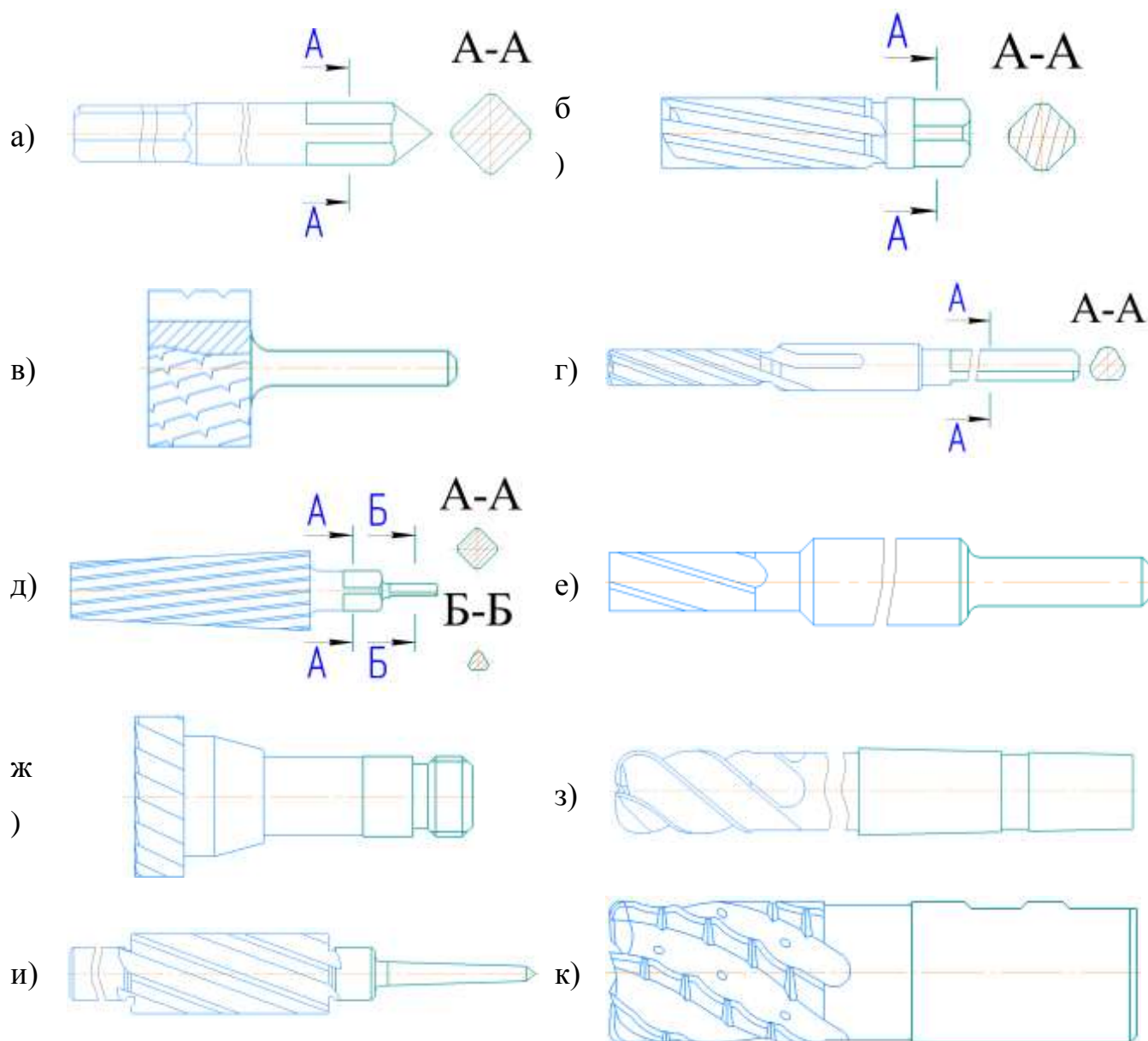


Рисунок 1.16 – Конструкция хвостовика инструмента

Определив конструктивные элементы осевого режущего инструмента, можем перейти к технологии его изготовления.

1.5 Предлагаемое применение технологии фрезоточения для производства режущих инструментов

Рынок режущего инструмента имеет стратегическое значение, поскольку в значительной мере влияет на современное машиностроительное производство. Отказ от закупки режущего инструмента за рубежом обусловлен экономической безопасностью, технологическим развитием, поддержкой национальной промышленности и снижением затрат. Одним из основных факторов,

определяющих успешность производства, являются затраты на инструмент – это значительная статья расходов в себестоимости машиностроительной продукции. При этом качество инструмента непосредственно влияет на производительность и является ключевым аспектом конкурентоспособности современных предприятий. В связи с этим, необходимо непрерывное совершенствование и повышение качества режущего инструмента, а также проведение анализа рынка для выявления новых тенденций и перспективных направлений развития с последующими инвестициями в рост производства [72, 118]. Применение фрезоточения может привести к устойчивому росту производительности и повышению прибыльности предприятий, а также к повышению качества осевого режущего инструмента.

Для получения требуемого эффекта, на первой стадии необходимо определить операции технологического процесса механообработки осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали, в которых применение фрезоточения будет приносить наибольший эффект.

Для определения требуемого эффекта рассмотрим концевую фрезу из быстрорежущей стали с волнообразной режущей кромкой для черновой обработки титановых сплавов (рисунок 1.17). Актуальность её изготовления обусловлена более высокой производительностью по сравнению с фрезами с неперетачиваемыми твердосплавными пластинами типа «кукуруза», а также стоимостью в 3-5 раз ниже, чем у зарубежных аналогов [104].

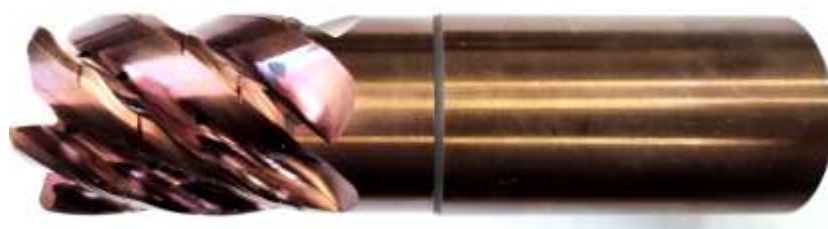


Рисунок 1.17 – Концевая фреза из быстрорежущей стали

Типовой технологический процесс изготовления концевой фрезы, без учета нанесения защитного покрытия, разделен на три основных этапа:

1. Предварительная и окончательная обработка перед термической обработкой;

2. Термообработка;

3. Формирование геометрии режущей части (шлифование и заточка).

Первым этапом при серийном изготовлении в инструментальном производстве осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали является обработка на пятикоординатных многозадачных станках с ЧПУ (рисунки 1.18, 1.19).

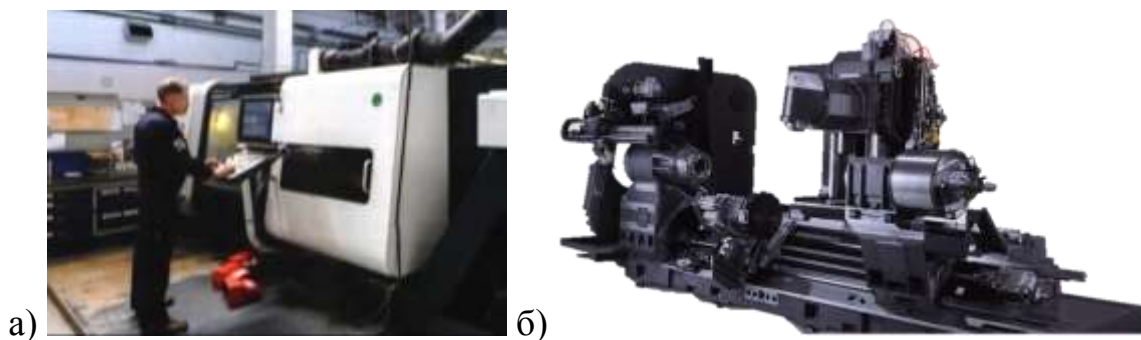


Рисунок 1.18 – Многозадачный обрабатывающий центр с ЧПУ
DMG CTX beta 1250: а) – общий вид; б) – устройство

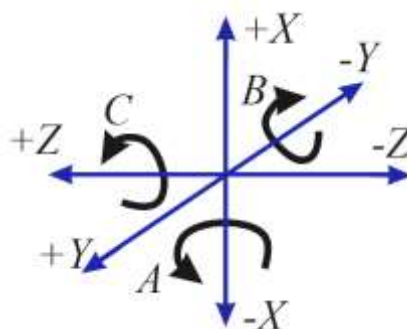


Рисунок 1.19– Оси многозадачного обрабатывающего центра с ЧПУ

На данном этапе осуществляется обработка таких частей фрезы как хвостовик, режущая часть и шейка (при ее наличии), конструктивные элементы которой приведены на рисунке 1.20. Рассмотрим подробнее технологические переходы, которые выполняются классическими токарными инструментами, например, проходными резцами.



Рисунок 1.20 – Конструктивные элементы типовой концевой фрезы из порошковой быстрорежущей стали

Следует заметить, что основная часть материала заготовок режущих инструментов удаляется до термообработки. На этой стадии выполняются такие операции как фрезерование, точение, нарезание резьбы и обработка отверстий.

С помощью продольного точения производится предварительная и окончательная обработка хвостовика, шейки, а также предварительная обработка режущей части и предварительная разгрузка стружечных канавок. Анализируя указанные переходы, следует иметь в виду, что возможны различные соотношения между диаметрами хвостовика и режущей части. Диаметр режущей части может быть как равен диаметру хвостовика, так и быть меньше его или больше. От данного соотношения зависит объем материала, удаляемого с частей фрезы при предварительной обработке. Также указанное соотношение определяет величину радиуса сопряжения между двумя поверхностями.

Все вышеперечисленные технологические переходы могут быть выполнены с применением фрезоточения. Следует отметить что, в отличие от универсальных токарных и фрезерных станков, многозадачные станки с ЧПУ не требуют модернизации и вспомогательных приспособлений для осуществления процесса фрезоточения [117, 120]. Дополнительный эффект фрезоточение дает, если в конструкции инструмента использован хвостовик типа Weldon, который представляет собой цилиндр с опорными площадками для надежной фиксации инструмента винтами (см. рисунок 1.16к). Так как опорные площадки обрабатываются фрезами, то появляется возможность их обработки и обработки цилиндрической части хвостовика одним инструментом, что повышает

производительность процесса и точность обработки за счет исключения погрешности, возникающей при смене инструмента.

Выбор инструмента для проведения фрезоточения зависит от геометрических параметров обрабатываемых частей инструмента, материала, и используемого оборудования. Обычно используются два типа фрез: монолитные твердосплавные фрезы и фрезы, оснащенные сменными многогранными пластинами. Каждый вид инструмента имеет свои преимущества и недостатки, но разнообразие инструмента для реализации процесса фрезоточения гораздо больше, чем при классическом точении.

В качестве заготовки для изготовления фрез выбирается пруток быстрорежущей стали стандартного диаметра таким образом, чтобы минимизировать объем удаляемого материала.

Осуществление межоперационного контроля является обязательной частью технологического процесса на протяжении всего цикла изготовления изделия. Важным фактором является контроль качества стали при помощи магнитных методов неразрушающего контроля [93]. Требования к точности и шероховатости обработанных поверхностей при выполнении рассматриваемых операций приведены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Требования к качеству поверхности

Технологический переход	Параметры качества поверхности	
	Отклонение, мм	Шероховатость Ra , мкм
Предварительная обработка хвостовика	$\pm 0,05$	3,2
Окончательная обработка хвостовика	h6	0,4
Предварительная обработка шейки	$\pm 0,05$	3,2
Окончательная обработка шейки	h12	1,6
Предварительная обработка режущей части	$\pm 0,05$	3,2

Продолжение таблицы 1.4

Окончательная обработка режущей части	h10	0,4
---------------------------------------	-----	-----

Как говорилось ранее, предварительная обработка режущей части формирует цилиндрическую поверхность заданного диаметра и опорные части хвостовика (рисунок 1.21а), далее с целью формирования стружечных канавок (рисунок 1.21б) обработка выполняется твердосплавной концевой радиусной фрезой.

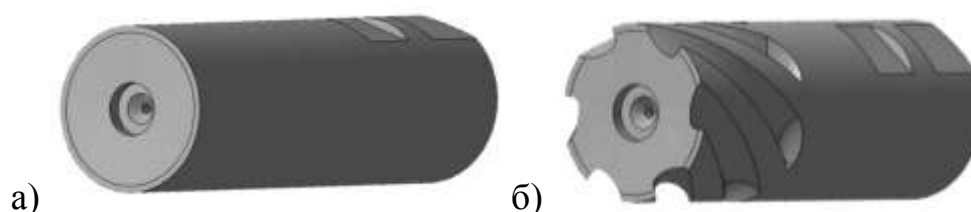


Рисунок 1.21 – Формирование конструктивных элементов:

а) – основание фрезы; б) – предварительная прорезка стружечных канавок

Окончательно режущую часть с заданными геометрическими параметрами получают на шлифовально-заточном станке с ЧПУ после термообработки (рисунок 1.22). Указанные операции в данной работе не рассматриваются.

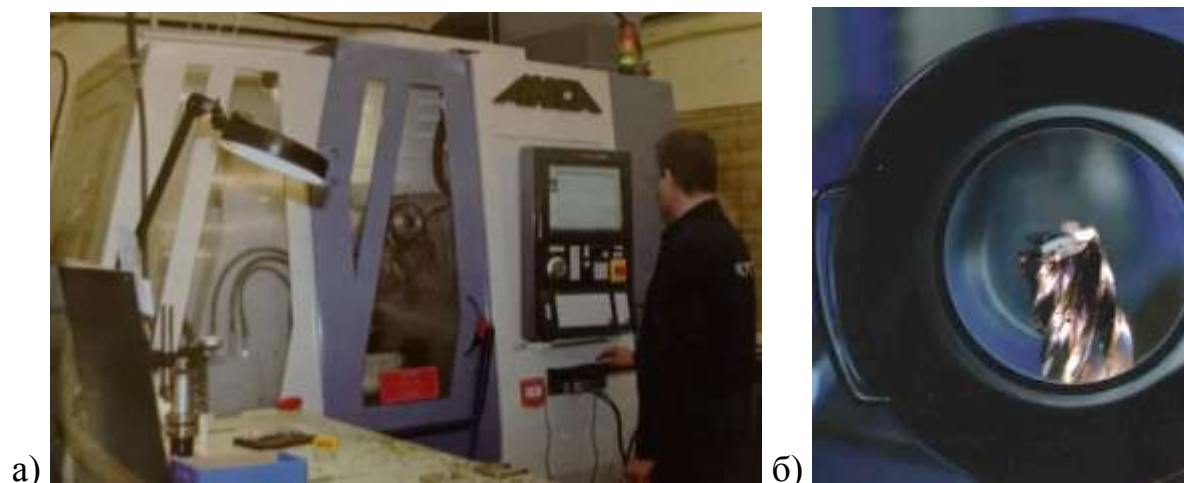


Рисунок 1.22 – Заключительные этапы работ изготовления осевого инструмента:

а) – формирование режущей части на шлифовально-заточном станке с ЧПУ;

б) – контроль режущей кромки на наличие сколов

Согласно опубликованным результатам исследований при использовании метода фрезоточения достигается шероховатость поверхности $Ra = 1,6$ мкм без потери производительности [66]. При этом производительность обработки по сравнению с классическим продольным точением может возрасти в 2..5 раз.

Исходя из технологических требований, приведенных в таблице 1.4, определены технологические операции обработки осевых инструментов из быстрорежущей стали, где фрезоточение наиболее эффективно. К ним относятся предварительная обработка хвостовика, шейки, режущей части и окончательная обработка шейки.

В результате проведенного анализа установлено влияние заданных параметров качества обработки частей осевых режущих инструментов на эффективность метода фрезоточения. Определены операции, при выполнении которых фрезоточение дает наибольший эффект. Полученные результаты могут быть использованы в инструментальной промышленности при разработке технологических процессов изготовления осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали.

1.6 Основные выводы, постановка цели и задач исследования

Анализ научно-технической литературы по состоянию вопроса позволяет сделать ряд **выводов**:

1. Технология фрезоточения представляет собой альтернативу традиционному токарному методу обработки, благодаря ряду ее преимуществ, таких как высокая производительность, сравнительно низкие температуры резания и как следствие увеличение срока службы инструментов;

2. Прерывистый характер процесса обработки при фрезоточении ограничивает рост температуры в зоне резания, что позволяет вести обработку при высоких скоростях резания;

3. Выполненный аналитический обзор рассмотренных работ позволяет сделать вывод, что фрезоточение является недостаточно изученным. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные авторами, были

посвящены конструкционным сталям, цветным металлам и их сплавам. Следует отметить, что работы носят частный характер и ориентированы на конкретное оборудование и обрабатываемый материал. Также предложенные авторами математические модели процесса фрезоточения в основном ориентированы на прогнозирование сил резания и параметров вибраций. Малоизученными остаются выходные параметры фрезоточения, такие как формирование «огранки», определение допустимых температурных зон, а также обрабатываемость быстрорежущих сталей, полученных разными методами.

4. Анализ технологических операций процесса механообработки осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали на многозадачном станке и требований к качеству обработанных поверхностей фрез показал, что благодаря использованию фрезоточения некоторые операции, выполняемые классическим продольным точением, могут быть заменены, что в свою очередь позволяет увеличить производительность обработки;

5. Выявлены технологические переходы, в которых фрезоточение дает наибольший технико-экономический эффект:

– обработка поверхностей с конструктивными элементами, порождающих прерывистое резание в тех случаях, когда при точении резцом он работает на удар;

– при обработке хвостовиков типа Weldon, который представляет собой цилиндр с опорными площадками для надежной фиксации инструмента винтами, цилиндрических, конических, квадратных и треугольных сечениях;

– при предварительной разгрузке стружечных канавок перед формированием режущей части инструмента.

На основании вышеизложенного определена **цель диссертационной работы**: повышение эффективности обработки осевых инструментов из быстрорежущей стали за счет применения метода фрезоточения на 5-координатных многозадачных станках с ЧПУ и токарных обрабатывающих центрах с приводным инструментом.

Для достижения поставленной цели требуется решить ряд задач:

1. Разработать имитационную математическую модель ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, позволяющую прогнозировать шероховатость обработанной поверхности с учетом режимов резания. Достоверность моделирования оценить лабораторными исследованиями;

2. Установить эмпирические зависимости параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки и геометрии системы: инструмент, заготовка, станок при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

3. Выявить зависимости величины «огранки» от подачи режущего инструмента и подачи, определяемой частотой вращения заготовки при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали;

4. Исследовать влияние температуры в зоне резания при выполнении операции ортогонального фрезоточения быстрорежущей стали, определить температурные зоны, позволяющие снизить критический износ инструмента;

5. Определить влияние структуры быстрорежущей стали, полученной классическим методом литья, и быстрорежущей стали, полученной методом порошковой металлургии, на ее обрабатываемость резанием;

6. Оценить эффективность использования фрезоточения в сравнении с классическим точением;

7. Разработать технологические рекомендации по фрезоточению быстрорежущей стали для изготовления осевого режущего инструмента, направленные на достижение максимальной производительности.

2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОРТОГОНАЛЬНОГО ФРЕЗОТочЕНИЯ

При описании аналитических и экспериментальных исследований в рамках первой главы настоящей работы был затронут вопрос недостаточной изученности таких параметров, как формирование отклонения формы типа «огранка», определение допустимых температурных зон в зоне резания для исключения фазовых изменений микроструктуры, а также обрабатываемость быстрорежущих сталей, полученных разными методами. Одним из инструментов для изучения перечисленных вопросов является математическое моделирование.

В настоящее время математическое моделирование сложных технологических систем обработки материалов резанием имеет важное научно-практическое значение для решения широкого спектра задач и обеспечивает:

- создание современной методологии исследований при освоении новых перспективных технологий обработки;
- сокращение проведения большого количества затратных исследований;
- научно обоснованный выбор рациональных режимов резания для получения необходимых выходных параметров.

2.1 Входные параметры при фрезоточении

Для определения режимов обработки, обеспечивающих качество поверхности при ортогональном фрезоточении, установим технологические факторы, непосредственно влияющие на качество поверхности. Это:

- подача на зуб S_z , мм/зуб;
- глубина резания t , мм;
- осевая ширина фрезерования $B_{ос}$, мм;
- скорость резания v , м/мин;
- частота вращения заготовки $n_{заг}$, об/мин;
- частота вращения инструмента $n_{и}$, об/мин.

Параметры глубины резания t и осевой ширины фрезерования $B_{ос}$ являются параметрами классического фрезерования, однако стратегия обработки,

применяемая во фрезоточении, представляет собой путь инструмента $l_{рез}$ являющийся отрезком, описанным спиралью по длине окружности C вокруг заготовки на заданную длину обработки L . На рисунке 2.1 представлена схема формирования геометрии при ортогональном фрезоточении, где α_{ae} – угол смещения фрезы;

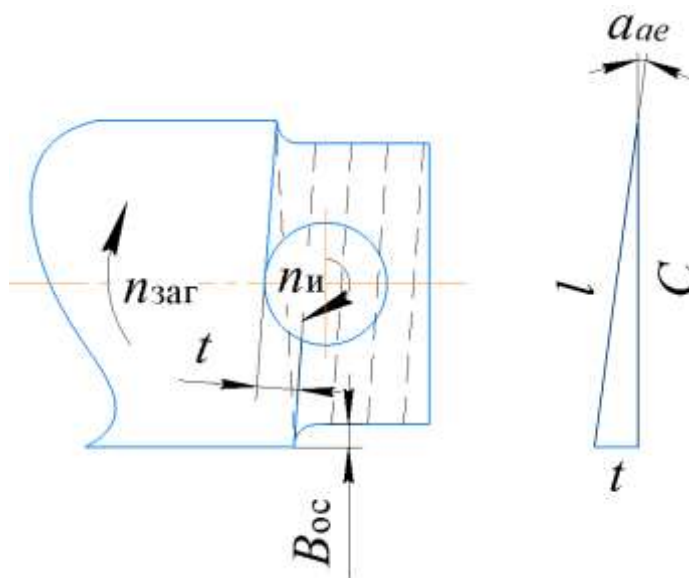


Рисунок 2.1 – Геометрия ортогонального фрезоточения

Расчет минутной подачи $S_{мин}$ выполняется по формуле (2.1):

$$S_{мин} = n_{и} \cdot Z \cdot S_z, \quad (2.2)$$

где Z – количество зубьев фрезы;

Учитывая то, что длина окружности C определяется как $C = \pi \cdot d$, формула расчета частоты вращения заготовки будет иметь вид (2.3):

$$n_{заг} = \frac{S_{мин}}{C}. \quad (2.3)$$

Угол смещения фрезы вдоль заготовки определяется по (2.4):

$$\alpha_{ae} = \arcsin^{-1}\left(\frac{C}{l_{рез}}\right). \quad (2.4)$$

Результат обработки поверхности зависит от функционирования всей сложной системы станочного оборудования. В процессе механической обработки главными параметрами, определяющими качество получаемой поверхности детали, являются точность ее геометрической формы и факторы, влияющие на ее формирование.

2.2 Математическая модель формирования шероховатости при ортогональном фрезоточении

Шероховатость поверхности, представляющая собой совокупность неровностей, оказывает значительное влияние на эксплуатационные свойства изделий. Микрогеометрия поверхности оценивается высотными, шаговыми и структурными параметрами шероховатости по профилю сечения поверхности. Одним из наиболее распространенных параметров шероховатости является среднее арифметическое отклонение профиля Ra оказывающее доминирующее влияние на эксплуатационные свойства, в частности на контактную жесткость, коррозионную стойкость, коэффициент теплопередачи. Параметр шероховатости Ra дает полное представление о топографии поверхности. Согласно ГОСТ 25142-82, отклонение Ra определяется как среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля поверхности на базовой длине l (рисунок 2.2) [88], и выражается как:

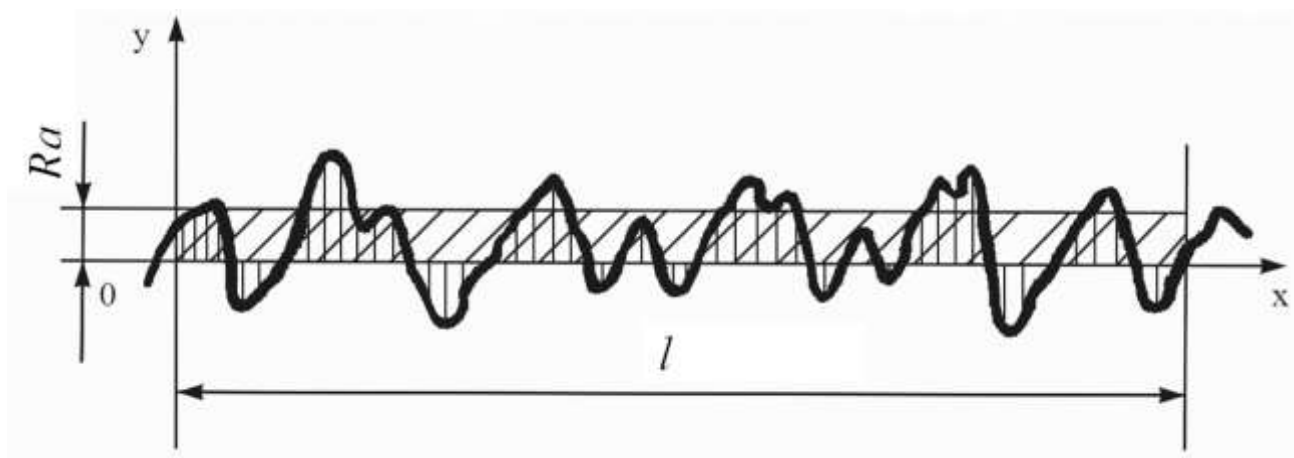


Рисунок 2.2 – Среднее арифметическое отклонение профиля Ra

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx. \quad (2.5)$$

или

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y|. \quad (2.6)$$

где n – число выбранных точек профиля на базовой длине;

y – отклонение профиля, выражающееся в расстоянии между любой точкой профиля и средней линией, мкм.

Шероховатость поверхности, обработанной ортогональным фрезоточением, представлена на рисунке 2.3. Схема формирования шероховатости показана на рисунке 2.3а, а обработанная поверхность приведена на рисунке 2.3б.

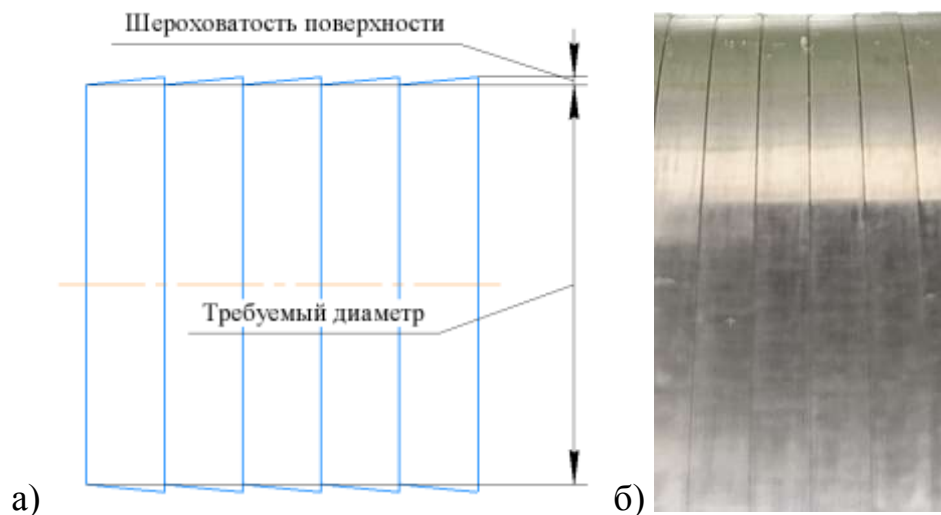


Рисунок 2.3 – Получение шероховатости поверхности при ортогональном фрезоточении: а) – схематическое; б) – экспериментальное

Таким образом, достижение высокой производительности при фрезоточении может столкнуться с проблемами качества поверхности, что потребует дополнительных исследований, направленных на оптимизацию процесса. В этом случае, указанные проблемы могут быть решены применением соответствующих математических моделей.

Как было отмечено ранее, повышенная шероховатость поверхности возникает при высоком значении параметра глубины резания [78].

Для повышения эффективности процесса обработки может быть использована математическая модель ортогонального фрезоточения (см. рисунок 1.4).

Математическая модель была создана на основе анализа и обобщения научно-исследовательских работ и результатов проведенных исследований Engin и Altintas [3, 15]. Оригинальность предложенной математической модели состоит в том, что она учитывает не только формирование микронеровностей, но и одновременно учитывает механические свойства обрабатываемой заготовки.

Математическая модель описывается тремя связанными между собой основными алгоритмами:

1. Алгоритм расчета сил резания;
2. Алгоритм расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя;
3. Алгоритм расчета угла запаздывания.

С помощью такой модели можно определить взаимное расположение режущих кромок и обрабатываемой поверхности с учетом одновременного вращения режущего инструмента и обрабатываемой заготовки, при этом производится расчет упругих перемещений инструмента в момент вхождения зуба фрезы в обрабатываемый материал. Учитывая, что по сформированной поверхности проходит следующий зуб, модель позволяет учесть переменную толщину срезаемого слоя и учесть регенеративные вибрации при резании. Выходным параметром программы является параметр шероховатости поверхности Ra .

В математической модели геометрия режущей части фрезы представлена в виде, отображенном на рисунке 2.4.

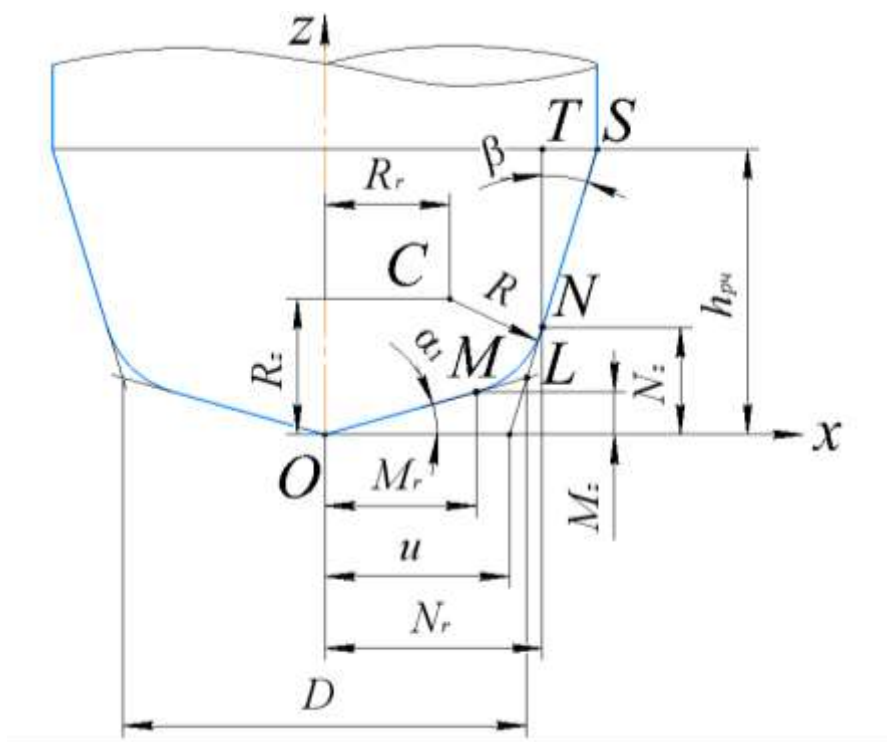


Рисунок 2.4 – Геометрические параметры фрезы [15]

Геометрические параметры используемые в качестве входных параметров, приведенные на рисунке 2.4, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Входные параметры модели

N	Параметр	Обозначение	Единица измерения
Геометрия фрезы	Диаметр фрезы	D	мм
	Количество зубьев	Z	шт
	Высота конца фрезы – высота от торца фрезы до основного тела с постоянным диаметром	$h_{рч}$	мм
	Расстояние от торца фрезы до точки С (по оси z (осевая))	R_z	мм
	Расстояние от оси фрезы до точки С по оси x;y (радиальная)	Rr	мм
	Радиус скругления режущей кромки – радиус дуги окружности с центром С, описывающей форму скругления режущей кромки фрезы на пересечении двух конусных поверхностей	R	мм
	Угол отклонения первой конусной поверхности фрезы от оси x;y	α_1	°
	Угол отклонения второй конусной поверхности фрезы от оси z	β	°
	Диаметр режущей части фрезы определяется по точкам пересечения двух конусных поверхностей фрезы	$D_{кон}$	мм
	Длина проекции участка OM на ось x;y	Mr	мм
	Длина проекции участка ON на ось x;y	Nr	мм
	Угол наклона режущей кромки фрезы	ψ	°

Продолжение таблицы 2.1

Заготовка	Диаметр заготовки	d	мм
	Вылет заготовки от кулачков.	l_k	мм
Режимы резания	Глубина резания	t	мм
	Осевая ширина резания	B_{oc}	мм
	Угол смещения фрезы	a_{ae}	°
	Длина окружности	C	мм
	Частота вращения фрезы	$n_{и}$	об/мин
	Подача фрезы	S_z	мм/зуб

В процессе обработки возникают возмущающие воздействия (вибрации):

- Горизонтальная составляющая силы резания, P_z , Н;
- Вертикальная составляющая силы резания P_x , Н;
- Радиальная составляющая силы резания P_y , Н.

Для оценки обработанной поверхности необходимо определить мгновенное значение толщины срезаемого слоя в процессе обработки. Толщина срезаемого слоя меняется на каждом резе от нуля до максимума, а затем снова до нуля, что характерно для процесса фрезерования. При расчете этого параметра учитываются регенеративные вибрации. Их влияние на поверхность описывается на схеме, изображенной на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема регенерации поверхности

В связи с тем, что в процессе фрезерной обработки поверхности режущей кромки инструмента происходят регенеративные вибрации, а также учитывая, что инструмент имеет угол наклона винтовой линии, точка на поверхности режущей кромки κ_i^{j+1} отстает от точки на предыдущем шаге κ_{i-dT}^{*j} вдоль оси инструмента, то есть имеет запаздывание (рисунок 2.6) [55, 56, 57].

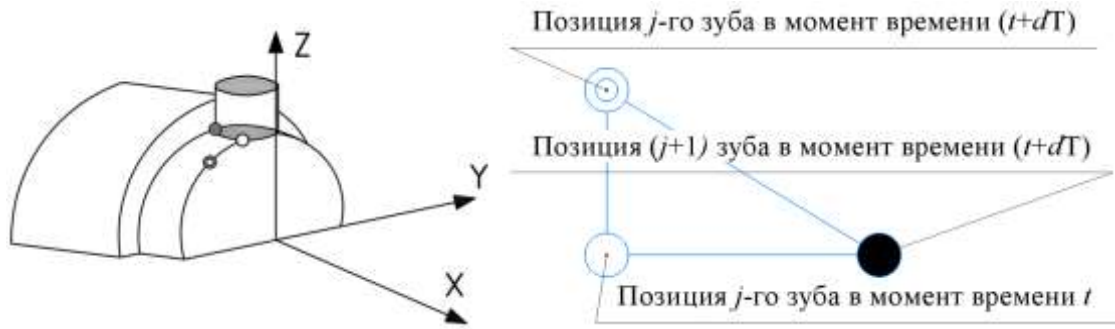


Рисунок 2.6 – Положения зубьев ($j, j + 1$) в момент времени ($t, t + dT$)

На рисунке 2.7 изображен процесс запаздывания режущей кромки, где κ_i^{j+1} – положение зуба в момент времени i ;

κ_{i-dT}^{*j} – обновленная точка траектории после зуба j в момент времени $i-dT$;

α_i – фазовый угол между положениями зубьев κ_i^{j+1} и κ_{i-dT}^{*j} .

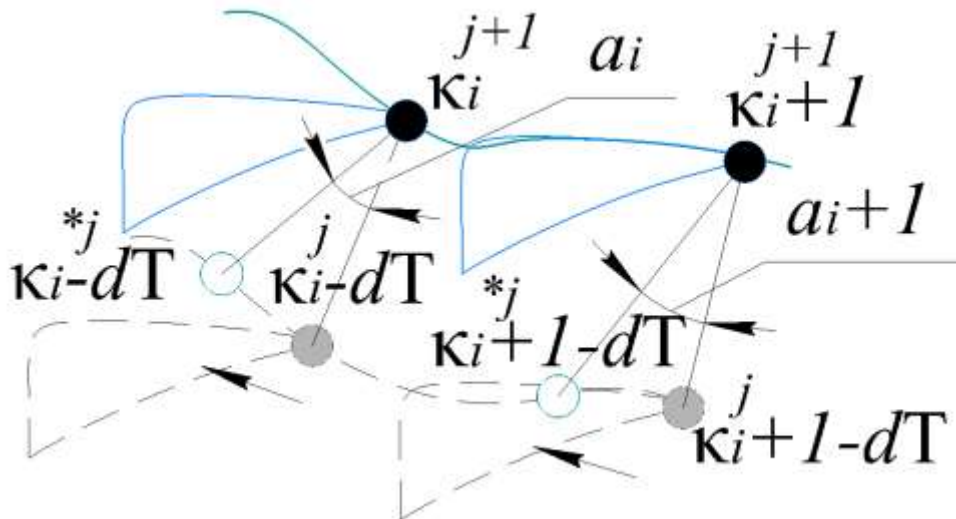


Рисунок 2.7 – Схема запаздывания зуба фрезы

Общая величина запаздывания при регенерации поверхности рассчитывается по формуле (2.7):

$$\tau_{j,i} = \frac{\alpha_i \cdot Z \cdot dT}{2 \cdot \pi} + dT, \quad (2.7)$$

где dT – период врезания зуба.

Для расчета сил резания необходимо также определить мгновенное положение зуба фрезы и величину срезаемого слоя h_j , где $P_{и}$ и $P_{заг}$ – сила порождаемая работой инструмента и сила совершаемая во время вращения заготовки (Рисунок 2.8).

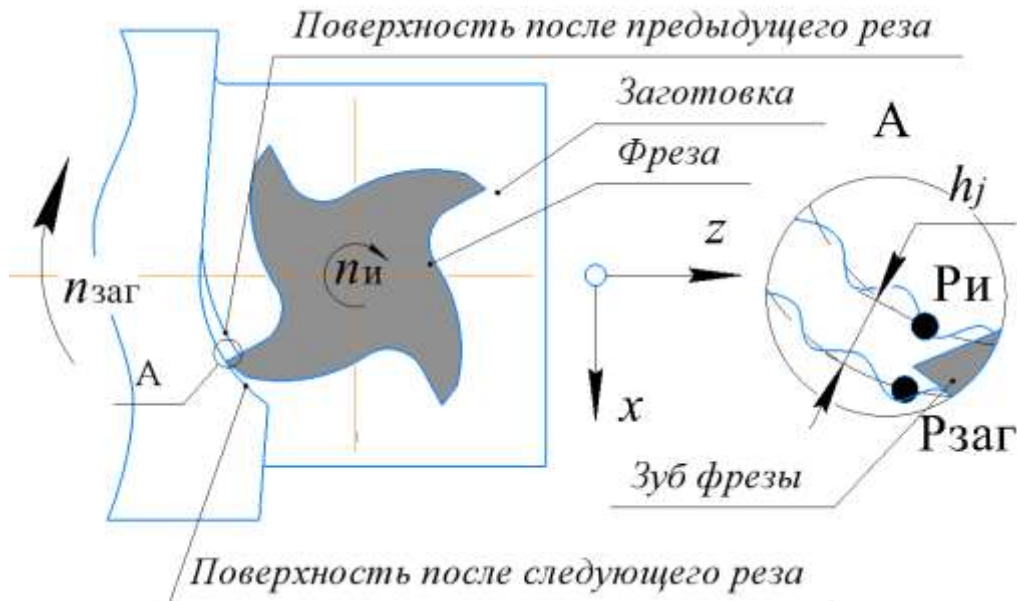


Рисунок 2.8 – Схема определения толщины срезаемого слоя

Мгновенного значение угла j -ого зуба определяется по формуле (2.8):

$$\phi_j(Z) = \phi + (j - 1)\phi_p - \psi(Z), \quad (2.8)$$

где $\phi_p = \frac{2 \cdot \pi}{z}$ – угол одного зуба фрезы;

$\psi(Z) = \frac{z \cdot \tan \beta(Z)}{R}$ – угол запаздывания;

где $\beta(Z)$ – угол наклона канавки на глубине z ;

ϕ – угол поворота инструмента.

Толщина срезаемого слоя определяется по формуле (2.9):

$$h_j(\phi_j, Z) = \frac{\phi_p}{2 \cdot \pi \cdot n_{и}} f_t(Z). \quad (2.9)$$

Мгновенное значение толщины срезаемого слоя h в момент времени t складывается из статической h_j^s и динамической величины h_j^d , приведенных в формуле (2.10):

$$h(t) = h_j^s(\phi_j, t) + h_j^d(\phi_j, t), \quad (2.10)$$

Результирующая сила резания dP_{rta}^t рассчитывается по формуле (2.11):

$$dP_{rta}^t(\phi_j, Z) = dP_{rta}^{d,c}(\phi_j, Z) + dP_{rta}^{d,pd}(\phi_j, Z) + dP_{rta}^{s,c}(\phi_j, Z) + dP_{rta}^{s,e}(\phi_j, Z), \quad (2.11)$$

где d – динамический показатель;

c – момент трения стружки об поверхность режущей кромки;

pd – момент демпфирования в результате контакта режущей кромки с уже обработанной поверхностью заготовки, имеющей определенный микропрофиль;

s – статический показатель;

e – угол наклона инструмента относительно заготовки.

Динамические составляющие (2.12, 2.13):

$$dP_{rta}^{d,c}(\phi_j, Z) = \begin{Bmatrix} K_{rc} \\ K_{tc} \\ K_{ac} \end{Bmatrix} h_j^d(\phi_j, t) db(Z), \quad (2.12)$$

где K_{rc} , K_{tc} , K_{ac} – коэффициенты сил резания;

$$dP_{rta}^{d,pd}(\phi_j, Z) = K_{sp} \left(-B_{oc} \frac{L_n^2}{2v_p} \frac{d(x_f)}{dt} \right), \quad (2.13)$$

где K_{sp} – коэффициент демпфирования;

L_n – линейный размер режущей кромки инструмента, задействованной в работе;

v_p – результирующая скорость резания;

$d(x_f)$ – вибрации, возникающие по направлению подачи.

Статические составляющие приведены в формулах (2.14) и (2.15):

$$dP_{rta}^{s,c}(\phi_j, Z) = k_{qc} h_j^s(\phi_j, t) db(Z), \quad (2.14)$$

где k_{qc} – сумма коэффициентов сил резания на плоскости;

$db(Z)$ – длина контакта.

$$dP_{rta}^{s,e}(\phi_j, Z) = k_{qe} dS(Z), \quad (2.15)$$

где k_{qe} – сумма коэффициентов для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности;

$dS(z)$ – бесконечно малая длина винтовой режущей части.

Модель предложенная Altintas взята за основу для адаптации под [4] формулы (2.16-2.18) описывают в общем виде каждую составляющую сил резания в радиальном, тангенциальном и аксиальном направлениях соответственно:

$$dP_r(\phi_j, Z) = k_{rc}h_j(\phi_j, Z)dZ + k_{re}dS, \quad (2.16)$$

где k_{rc} – коэффициент радиальной силы резания;

k_{re} – коэффициент радиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

$$dP_t(\phi_j, Z) = k_{tc}h_j(\phi_j, Z)dZ + k_{te}dS, \quad (2.17)$$

где k_{tc} – коэффициент тангенциальной силы резания;

k_{te} – коэффициент тангенциальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

$$dP_a(\phi_j, Z) = k_{ac}h_j(\phi_j, Z)dZ + k_{ae}dS, \quad (2.18)$$

где k_{ac} – коэффициент аксиальной силы резания;

k_{ae} – коэффициент аксиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Определение коэффициентов сил резания производится в разделе 2.3.4.

Результаты расчетов по модели позволяют построить микрогеометрию обработанной поверхности. Представленная на рисунке 2.9 поверхность представляет собой цилиндр после обработки торцом фрезы с радиусом сопряжения (радиус режущей кромки фрезы) к торцевой поверхности (снятый боковой частью фрезы). На рисунке 2.10 на виде А представлен обработанный слой материала в виде треугольников, из подробного вида Б можно сделать вывод о том, что материал снят не полностью, а обработанная поверхность имеет отклонение формы «огранку».

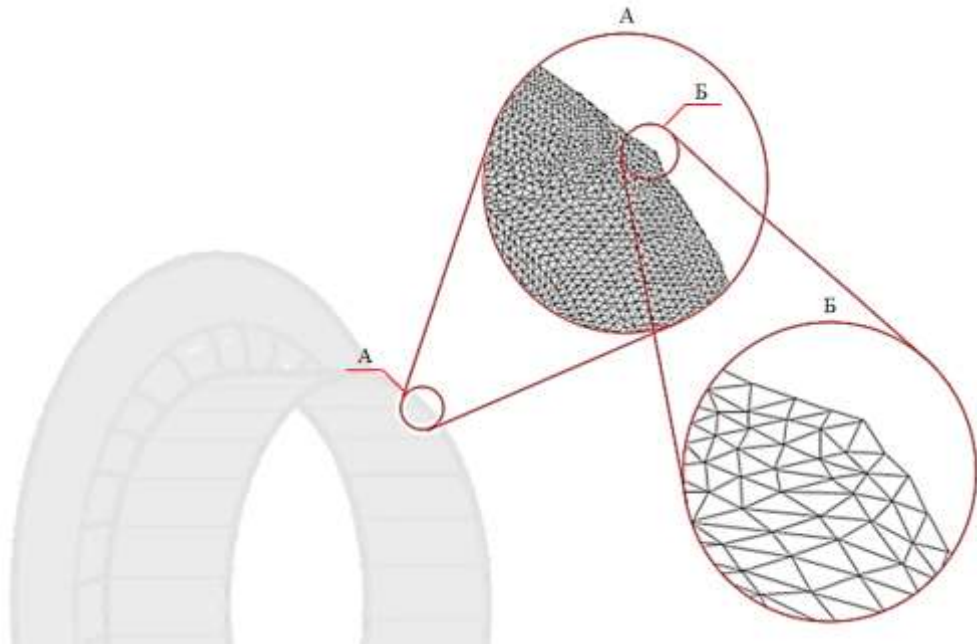


Рисунок 2.9 – Результаты моделирования поверхности

Параметры резания были вычислены с использованием метода имитационного моделирования, а затем экспериментально проведена проверка точности разработанных моделей.

На рисунке 2.10 представлен микропрофиль, рассчитанный в Matlab при ортогональном фрезоточении заготовки из быстрорежущей стали Р6М5К5-МП диаметром $\varnothing 100$ мм концевой твердосплавной фрезой диаметром $D = 16$ мм с четырьмя зубьями.

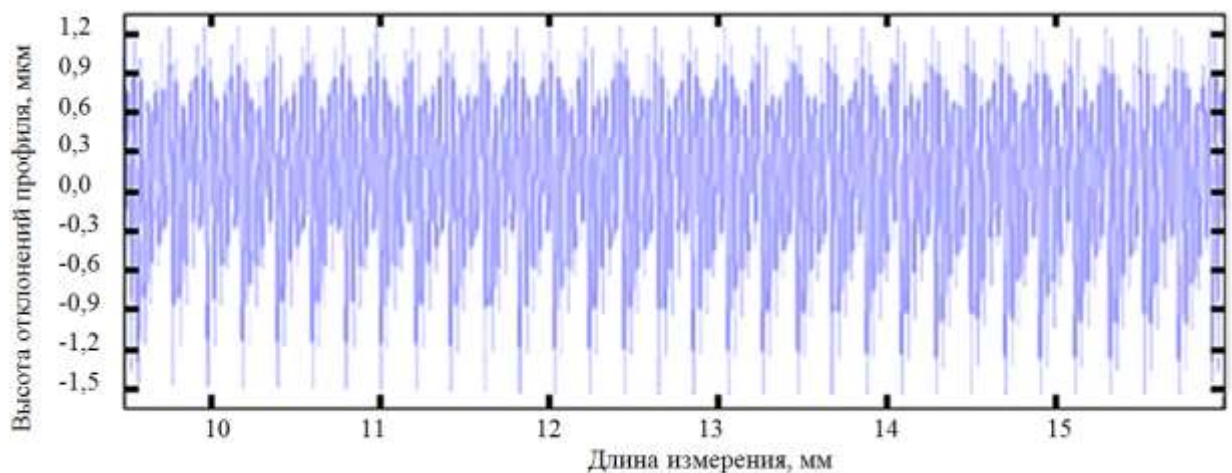


Рисунок 2.10 – Рассчитанный микропрофиль обработанной поверхности

Для выбора оптимальных параметров обработки необходимо рассчитать производительность процесса ортогонального фрезоточения и соотнести эти

данные с полученными при моделировании значениями шероховатости поверхности и варьируемыми данными при расчете (рисунки 2.11 и 2.12).

Для расчета производительности процесса ортогонального фрезоточения использовалась следующая формула (2.19):

$$W = n_{\text{и}} \cdot S_{\text{пр}} \cdot B_{\text{ос}} \cdot (d_{\text{заг}} - B_{\text{ос}}), \quad (2.19)$$

где $S_{\text{пр}}$ – подача инструмента на оборот заготовки;

$d_{\text{заг}}$ – диаметр заготовки;

$B_{\text{ос}}$ – осевая ширина резания.

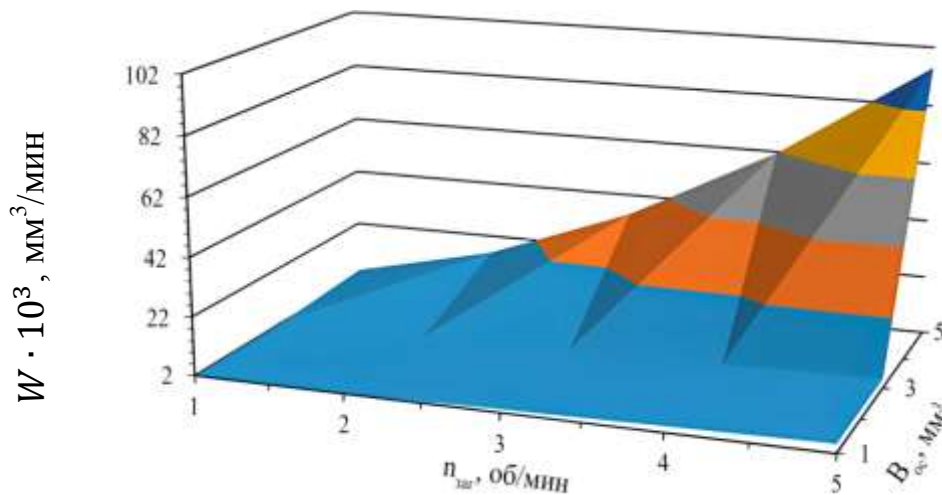


Рисунок 2.11 – Диаграмма зависимости производительности процесса обработки от частоты вращения заготовки и осевой ширины резания

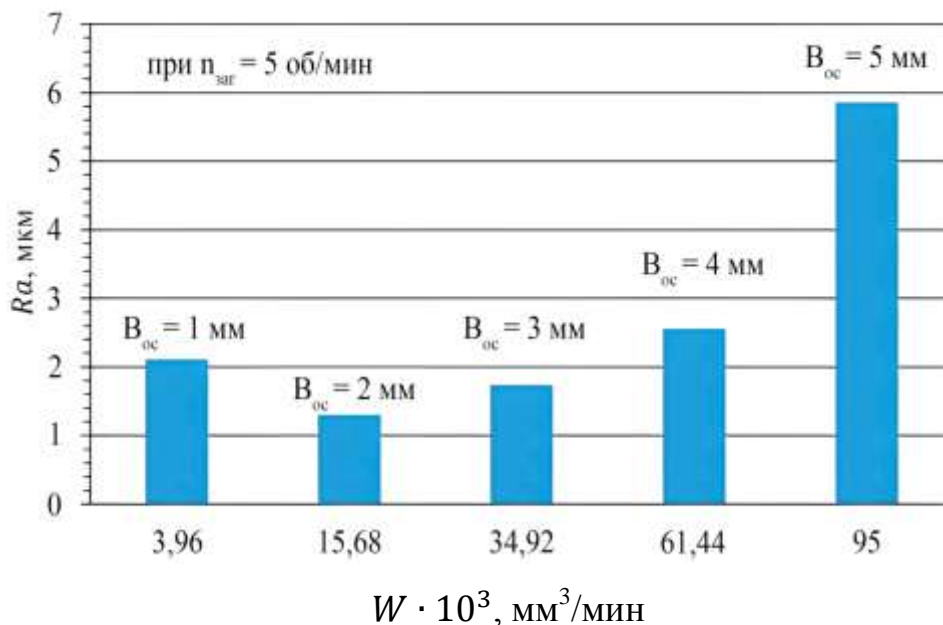


Рисунок 2.12 – Диаграмма значений шероховатости и производительности процесса обработки при $n_{\text{заг}} = 5 \text{ мин}^{-1}$ и $B_{\text{ос}} = 1..5 \text{ мм}$

Учитывая схему процесса ортогонального фрезоточения, врезание должно происходить в радиальном направлении, при этом скорость вращения заготовки должна соответствовать подаче на зуб, рекомендованной для используемого инструмента. Данное условие позволяет учитывать возможности инструмента и оборудования при выборе оптимальной частоты вращения заготовки.

При моделировании шероховатости поверхности при ортогональном фрезоточении использовалась интерактивная среда программирования и визуализации результатов Matlab, зарекомендовавшая себя наилучшим образом при моделировании сложных технических систем.

2.3 Статическая математическая модель ортогонального фрезоточения

Под математической моделью фрезоточения в широком диапазоне режимов резания понимаются уравнения, связывающие выходные параметры: шероховатость поверхности, температуру в зоне резания, отклонение формы типа «огранка», силы резания с факторами, воздействующими на объект исследования.

2.3.1 Математическая модель шероховатости поверхности

Отклонение шероховатости поверхности Ra может быть описано линейной математической моделью множественной регрессии [98], представленной уравнением 2.20:

$$Ra = K + a_1 \cdot S_z + a_{11} \cdot S_z^2 + a_2 \cdot v + a_{22} \cdot v^2 + a_3 \cdot t + a_{33} \cdot t^2, \quad (2.20)$$

где K , a_1 , a_2 , a_3 – параметры исследуемой модели.

Прологарифмировав выражение принятой модели (2.20), принимает вид:

$$\ln Ra = \ln K + a_1 \cdot \ln S_z + a_{11} \cdot \ln S_z^2 + a_2 \cdot \ln v + a_{22} \cdot \ln v^2 + a_3 \cdot \ln t + a_{33} \cdot \ln t^2. \quad (2.21)$$

Произведя подстановку вида, расчетное значение регрессии y_1 , представляющее собой оценку ожидаемого значения, при постоянных значениях факторов принимает вид:

$$y_1 = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2, \quad (2.22)$$

где $y_1 = \ln Ra$;

b_0, b_1, b_2, b_3 – постоянные коэффициенты;

x_0 – фиктивная переменная;

x_1, x_2, x_3 – кодированные значения факторов.

В результате преобразований получена модель шероховатости поверхности, адекватность которой проверена в разделе 4.1.

2.3.2 Математическая модель температуры в зоне резания

Изучение тепловых явлений в процессе обработки представляет большой научно-практический интерес, так как теплота Q , возникающая при механической обработке, оказывает прямое влияние на стойкость режущего инструмента, его износ, а также на точность обработки [100, 101, 102]. Общеизвестным является тот факт, что эффективным средством управления процессом теплообмена при механической обработке является переход от непрерывного резания к прерывистому. К тому же высокие тепловые нагрузки обуславливают возникновение напряжения в обработанной поверхности, что в свою очередь, может привести к возникновению микротрещин на поверхности заготовки. Поэтому инструмент и режимы резания необходимо выбирать таким образом, чтобы обеспечить минимальный перенос тепла резания в обрабатываемую деталь.

Целью этой части работы является исследование воздействия различных режимов резания на температурные характеристики зоны резания. В данном контексте возможно использование линейной математической модели множественной регрессии, которая представляет отклонения температуры в зоне резания T и может быть выражена уравнением (2.23):

$$T = K + a_1 \cdot S_z + a_{11} \cdot S_z^2 + a_2 \cdot v + a_{22} \cdot v^2 + a_3 \cdot t + a_{33} \cdot t^2. \quad (2.23)$$

Прологарифмировав выражение (2.23), принимает вид:

$$\ln T = \ln K + a_1 \cdot \ln S_z + a_{11} \cdot \ln S_z^2 + a_2 \cdot \ln v + a_{22} \cdot \ln v^2 + a_3 \cdot \ln t + a_{33} \cdot \ln t^2. \quad (2.24)$$

Переименуем выражение аналогичным образом (2.25):

$$y_1 = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_3 \cdot x_3 + b_{33} \cdot x_3^2. \quad (2.25)$$

В результате преобразований получена статическая математическая модель температуры в зоне резания, которая проверена на адекватность в разделе 4.2.

2.3.3 Моделирование зависимости «огранки» от входных параметров

Метод обработки детали, основанный на фрезоточении, имеет некоторые недостатки. Например, с использованием этого метода невозможно получить идеально круглую форму детали. Из-за того, что инструмент и деталь вращаются одновременно, поперечное сечение детали имеет форму многоугольника (эффект «огранки»), как это показано на рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Поперечное сечение заготовки, получаемой при ортогональном фрезоточении

За счет «огранки» ухудшается качество обработанной поверхности. Ошибка в форме детали зависит от геометрических параметров инструмента и режимов резания [13, 22, 108]. Обоснованный выбор режимов резания может повысить точность формы детали, однако это может привести к снижению эффективности фрезоточения. Поэтому необходима предварительная оценка отклонений размера и круглости, заданных в конструкторской документации. Осевая ширина резания, а также соотношение скоростей вращения инструмента и заготовки, являются наиболее значимыми факторами, влияющими на ошибки в округлости.

Целью исследования является определение влияния режимов резания на формирование отклонений формы заготовки при фрезоточении.

Для построения математических моделей, отражающих важнейшие свойства системы лезвийной обработки режущим инструментом из твердого сплава, за основу были приняты функциональные зависимости определенные исследованиями Comak и Karaguzel [13, 22], максимальная высота пика «огранки» может быть определена с использованием математической модели, выраженной в формуле (2.26):

$$e_{c\ max} = R_w^e \cdot \left(\frac{1}{\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)} - 1 \right), \quad (2.26)$$

где R_w^e – фактический радиус заготовки;

θ – угловая скорость инструмента.

Для расчета угловой скорости инструмента используется формула (2.27).

$$\theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{заг}}}{n_{\text{и}} \cdot Z}, \quad (2.27)$$

где $n_{\text{заг}}$ – частота вращения заготовки;

$n_{\text{и}}$ – частота вращения инструмента;

Z – количество зубьев инструмента.

«Огранка», формируемая в процессе ортогонального фрезоточения, будет иметь условный вид, представленный на рисунке 2.14, где b является условным размером грани, а e_c является высотным отклонением на выбранном участке сечения детали.

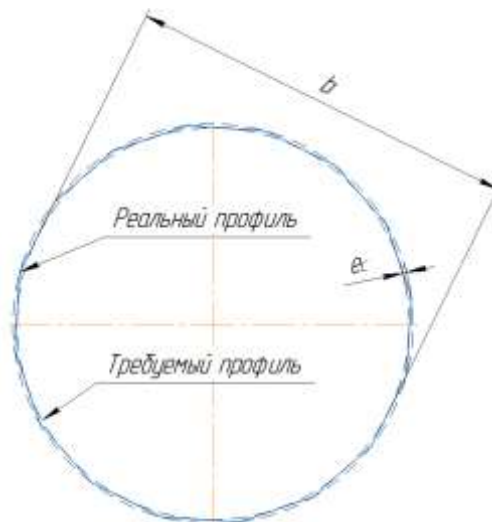


Рисунок 2.14 «Огранка», формируемая в процессе ортогонального фрезоточения

Проверка адекватности модели формирования «огранки» (2.24) будет проведена в разделе 4.3.

2.3.4 Математическая модель сил резания

Необходимым условием для практической реализации исследования является всестороннее изучение влияния структуры материала быстрорежущих сталей на силы резания. Составляющие сил резания в декартовой системе координат:

- горизонтальная составляющая силы резания, P_z ;
- вертикальная составляющая силы резания, P_x .

Для исключения влияния второстепенных факторов, применялось точение в условиях свободного прямоугольного резания [106].

Для получения сил резания P_z и P_x в процессе свободного прямоугольного точения строятся графики зависимости этой силы от величины подачи в соответствующих направлениях – тангенциальном и осевом. Схематичное изображение определения сил резания при точении представлено на рисунке 2.15.

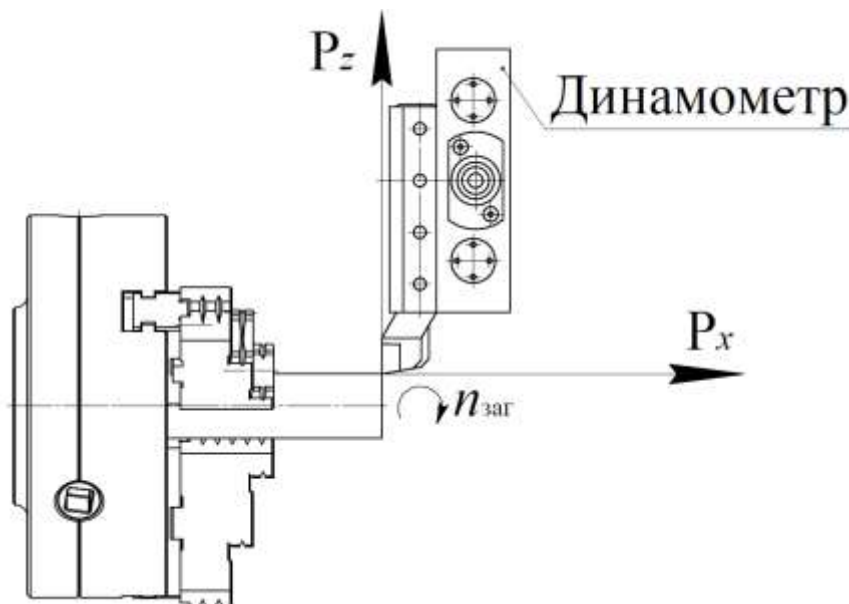


Рисунок 2.15 – Схема определения сил резания при точении

Существуют современные методики определения обрабатываемости резанием, которые имеют универсальный характер. Например, можно выделить метод определения коэффициентов сил резания [43]. Данный метод не просто

позволяет оценить обрабатываемость материала, но и использовать в дальнейшем рассчитанные коэффициенты сил резания для определения областей стабильного резания [2, 50, 110]. В свою очередь, области стабильного резания дают возможность технологам рассчитать оптимальные режимы резания для конкретной технологической системы и добиться максимальной производительности процесса обработки при заданном качестве поверхности и экономически приемлемой стойкости инструмента [27, 32].

При определении коэффициентов сил резания возможно варьирование геометрических параметров режущего инструмента, например, переднего или заднего угла [110, 111]. Это является дополнительным преимуществом метода, так как дает информацию для оптимизации геометрии режущего инструмента и повышает точность прогнозирования областей стабильного резания.

Метод определения возможности обработки материала основан на определении коэффициентов сил резания и использует линейную модель силы резания с коэффициентами краев [98].

Согласно теории Merchant и исследований Altintas, представлены проекции сил резания (2.28) и (2.29), которые рассчитываются при заданных значениях параметров угла трения, угла сдвига и касательного напряжения [4, 33].

$$P_z = a_c \cdot b_c \left(\tau_s \cdot \frac{\cos(\beta_a - \gamma)}{\sin \varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \gamma)} \right); \quad (2.28)$$

$$P_x = a_c \cdot b_c \left(\tau_s \cdot \frac{\sin(\beta_a - \gamma)}{\sin \varphi_c \cos(\varphi_c + \beta_a - \gamma)} \right), \quad (2.29)$$

где P_x – главная сила резания в осевом направлении;

P_z – сила резания в тангенциальном направлении;

a_c – толщина среза;

b_c – ширина среза;

τ_s – касательные напряжения плоскости сдвига, равномерно распределяемые по плоскости;

Угол сдвига выступает как параметр процесса резания, который определяет направление деформации. Его значение определяется с помощью уравнения (2.30).

$$\varphi_c = \frac{\pi}{4} + \gamma - \beta_a, \quad (2.30)$$

где φ_c – угол сдвига;

γ – главный передний угол резца;

β_a – угол между результирующей силой и перпендикуляром к передней поверхности.

Также угол β_a является углом трения между инструментом и стружкой.

Так как определение угла трения и угла сдвига вызывает затруднения, эти параметры были объединены в один коэффициент, который называется удельное давление резания K . В результате, уравнения (2.28) и (2.29) представлены в виде (2.31) и (2.32).

$$P_x = a_c b_c l_c K_x K_a^\mu; \quad (2.31)$$

$$P_z = a_c b_c l_c K_z K_a^\mu, \quad (2.32)$$

где K_x – удельное давление резания в осевом направлении;

K_z – удельное давление резания в тангенциальном направлении;

K_a^μ – коэффициент утолщения стружки;

l_c – длина среза.

Метод определения обрабатываемости материала на базе коэффициентов сил резания основан на линейной модели сил резания с краевыми коэффициентами [33]. Согласно данной модели уравнения сил резания записываются в виде (2.33) и (2.34):

$$P_z = K_{zC} K_a b_c + K_{zE} b_c; \quad (2.33)$$

$$P_x = K_{xC} K_a b_c + K_{xE} b_c, \quad (2.34)$$

где K_{zC} , K_{xC} – коэффициенты тангенциальной и осевой сил резания;

K_{zE} , K_{xE} – коэффициенты тангенциальной и осевой сил контакта;

K_a – коэффициент утолщения стружки.

На основании вышеизложенного, уравнения 2.33 и 2.34 можно представить в виде:

$$P_z = A_z K_a + B_z; \quad (2.35)$$

$$P_x = A_x K_a + B_x, \quad (2.36)$$

где A_z – наклон линии тренда тангенциальной силы резания;

A_x – наклон линии тренда осевой силы резания;

B_z – смещение линии тренда тангенциальной силы резания;

B_x – смещение линии тренда осевой силы резания.

На основе уравнений 2.33-2.36 получаем следующие зависимости:

$$K_{ZC} = \frac{A_z}{b_c}; \quad (2.37)$$

$$K_{ZE} = \frac{B_z}{b_c}; \quad (2.38)$$

$$K_{XC} = \frac{A_x}{b_c}; \quad (2.39)$$

$$K_{XE} = \frac{B_x}{b_c}. \quad (2.40)$$

Для получения всех параметров, используемых в уравнениях 2.37-2.40, требуется проведение работ по одноточечному прямоугольному резанию [18].

Значения коэффициентов сил резания, полученные в результате расчетов, приведены в таблице 2.2 [103].

Таблица 2.2 Коэффициенты зависимостей, составляющих силы резания полученные при токарной обработке быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП [103]

Задний угол резца α , °	Коэффициенты сил резания			
	P6M5K5		P6M5K5-МП	
	Тангенциальный, K_{XC} , Н/мм ²	Осевой, K_{ZC} , Н/мм ²	Тангенциальный, K_{XC} , Н/мм ²	Осевой, K_{ZC} , Н/мм ²
2	1943,33	-46,67	2160,00	293,33
4	1816,67	146,67	2130,00	690,00
6	1890,00	-53,33	2103,33	556,67
8	1943,33	-160,00	2156,67	386,67
10	1960,00	130,00	2216,67	710,00

В разделе 4.4 представлен результат анализа сил резания и экспериментальное подтверждение работоспособности рассмотренной модели.

2.4 Выводы по второй главе

По результатам проведенных работ по разработке и адаптации математических моделей выявлено следующее:

1. Разработанная динамическая математическая модель учитывает формирование обработанной поверхности при прохождении каждого зуба фрезы. Ее применение позволяет прогнозировать состояние поверхности при ортогональном фрезоточении и отражает общую картину процесса резания;

2. Алгоритм расчета мгновенной толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при ортогональном фрезоточении работает на основе математических моделей. Для этого алгоритма используется механизм запаздывания, который создается в результате регенерации поверхности. Он учитывает геометрические параметры режущего инструмента, что обеспечивает высокую точность и качество обработки поверхности изделия;

3. Основным преимуществом разработанных статических математических моделей является возможность выявления факторов влияющих на качество поверхности (шероховатость и «огранку»), температуру в зоне резания, а также силы резания с последующей статистической обработкой информации, что позволяет определить оптимальные параметры режимы резания ортогонального фрезоточения.

3 МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проверки представленных во второй главе настоящей работы динамической математической модели и адаптированных статических математических моделей, необходимо разработать методику проведения экспериментальных исследований ортогонального фрезоточения. Методика включает в себя выбор оборудования и средств технического оснащения, заготовок, режущего инструмента, режимов резания и средств измерения для проведения исследования.

3.1 Оборудование и средства технического оснащения для проведения исследования

Для проведения эксперимента выбран токарный обрабатывающий центр DMG NEF400, оснащенный стойкой ЧПУ Siemens 840D с приводным инструментом и дополнительной осью С (рисунок 3.1), благодаря которой возможно выполнять обработку вращающимся инструментом (фрезы, сверла, расточные головки и т.д.).



Рисунок 3.1 – Токарный обрабатывающий центр DMG NEF400

Высокая точность станка достигается благодаря использованию конструкции, которая обеспечивает симметричное распределение тепла, и системе непосредственных измерений. Таблица 3.1 содержит технические параметры станка DMG NEF400.

Таблица 3.1 – Технические параметры станка DMG NEF400

Параметр	Единица измерения	Величина
Максимальный диаметр заготовки	мм	350
Максимальная длина заготовки при обработке в центрах (обрабатываемая)	мм	650
Тип инструментального гнезда	–	VDI 30
Инструментальных мест в револьвере	–	12
Количество инструментальных мест для приводного инструмента	–	5
Максимальная частота вращения шпинделя	об/мин	4500
Ускоренная подача по оси Z	м/мин	20
Ускоренная подача по оси X	м/мин	24
Мощность (длительность включения 60 %)	кВт	11,5
Мощность (длительность включения 100 %)	кВт	8
Максимальная частота вращения приводного инструмента	об/мин	4500
Крутящий момент приводного инструмента	Нм	17,5

Для реализации кинематической схемы ортогонального фрезоточения (см. раздел 1.2.1) определены инструментальные наладки на базе инструментальных блоков для приводного инструмента:

– 410503035-30 Sauter с системой крепления Capto 3 (рисунок 3.2а);

– 0.5.941.203-087536 Sauter со встроенным цанговым патроном (рисунок 3.26).

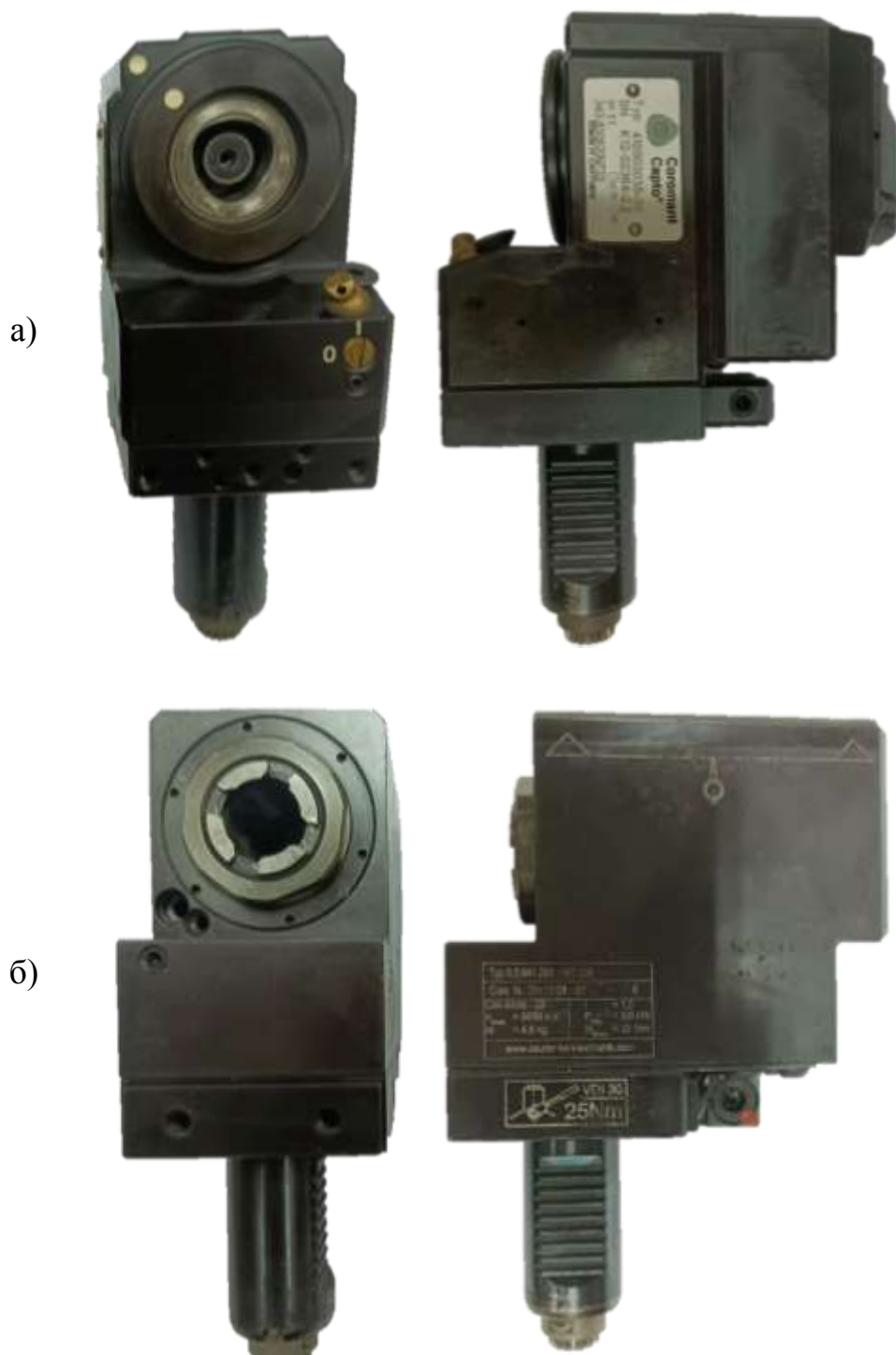


Рисунок 3.2 – Приводные блоки: а) – 410503035-30; б) – 0.5.941.203-087536

Технические данные приводных блоков указаны в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические данные приводных блоков

Параметр	Величина	
		410503035-30
Интерфейс адаптера	Capto 3	DIN 6499 -25 1-16
Интерфейс со стороны станка	VDI30A	
Угол корпуса заготовки	90°	
Отверстие под смазочно-охлаждающую жидкость	1	

Приводные блоки закрепляются в револьверной головке станка (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Общий вид инструментального блока установленный в револьверную головку станка

В связи с применением инструмента с различным типом хвостовиков используются следующие инструментальные наладки:

- Режущий инструмент с хвостовиком Capto закрепляется непосредственно в приводной блок 410503035-30 (рисунок 3.4а);
- Режущий инструмент с цилиндрическим хвостовиком менее $\varnothing 12$ закрепляется в силовой прецизионный патрон C3-391.HMD-12 049 с последующей установкой в блок 410503035-30 (рисунок 3.4б);
- Режущий инструмент с цилиндрическим хвостовиком более $\varnothing 12$ закрепляется с использованием цанги в инструментальном блоке 0.5.941.203-087536 (рисунок 3.4в).

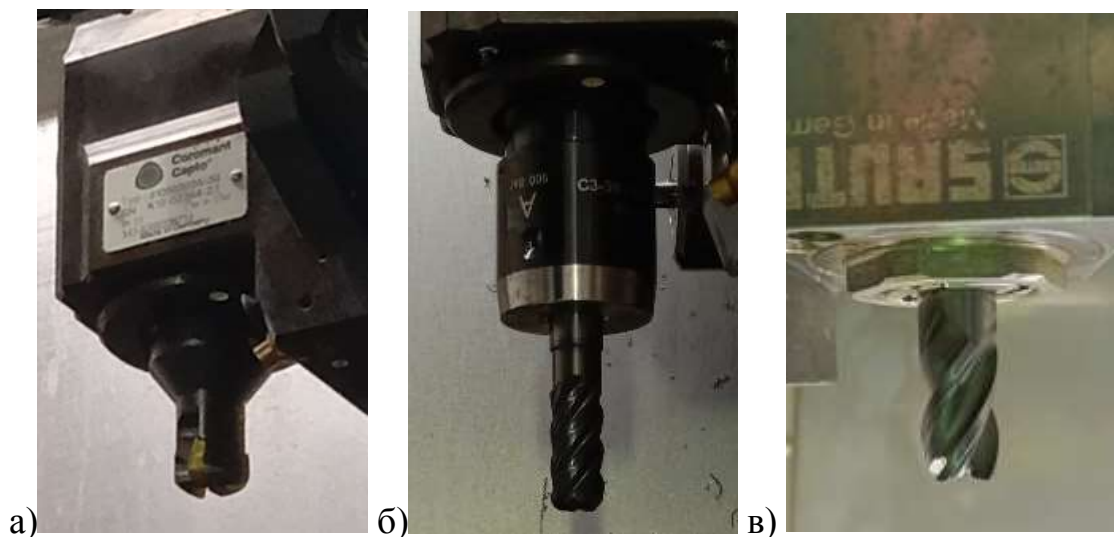


Рисунок 3.4 – Инструментальные наладки на базе приводных блоков:

- а) – закрепление инструмента с хвостовиком Capto 3;
- б) – закрепление инструмента с цилиндрическим хвостовиком до $\varnothing 12$ мм;
- в) закрепление инструмента с цилиндрическим хвостовиком свыше $\varnothing 12$ мм

3.2 Заготовки для проведения исследования

В качестве образцов для проведения экспериментов выбраны заготовки из быстрорежущих сталей: Böhler S390 MICROCLEAR (код MC P3.1.Z.AN), P6M5K5-МП (ДИ101-МП), полученные методом порошковой металлургии; P6M5K5, полученная обычным методом. Все используемые заготовки были в состоянии поставки.

Заготовки должны быть предварительно обработаны точением, для устранения биения, а также иметь предварительно сформированные канавки, обеспечивающие радиальное врезание фрезы (рисунок 3.5а). Для исследования обрабатываемости быстрорежущих сталей применяется заготовка с размерами: $\varnothing 21 \times 3 \times 40$ мм из P6M5K5-МП и P6M5K5 (рисунок 3.5б). Технические параметры заготовок соответствуют значениям, представленным в таблице 3.3.

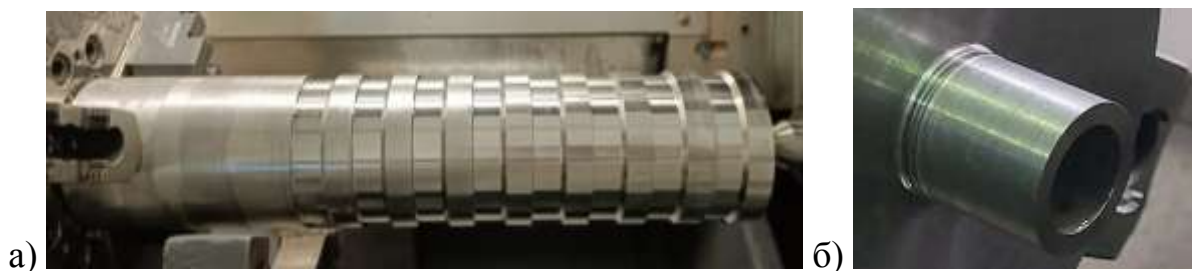


Рисунок 3.5 – Заготовки для проведения исследований:

а) – ортогонального фрезоточения; б) – обрабатываемости быстрорежущих сталей

Таблица 3.3 – Технические параметры заготовок

Марка материала	Твердость, <i>НВ</i>	$d_{\text{заг}}$, мм	$L_{\text{заг}}$, мм
Böhler S390 MICROCLEAR	259	98	300
P6M5K5-МП	205	98	450
P6M5K5	262	98	450

Зажим и базирование заготовок производится в трехкулачковом гидравлическом патроне с поджатием вращающимся центром.

3.3 Режущий инструмент для проведения исследования

3.3.1 Выбор осевого инструмента для ортогонального фрезоточения

При выборе инструмента были рассмотрены фрезы производства фирм: Sandvik, YG-1, Томского инструментального завода. В качестве режущего инструмента рассматривался следующий:

– фреза для обработки прямоугольных уступов Sandvik Coromant CoroMill R390-020C3-11M050, диаметром $D = 20$ мм оснащенная тремя сменными многогранными пластинами R390-11 T3 31E-PM 4240, $Z = 3$ (рисунок 3.6);

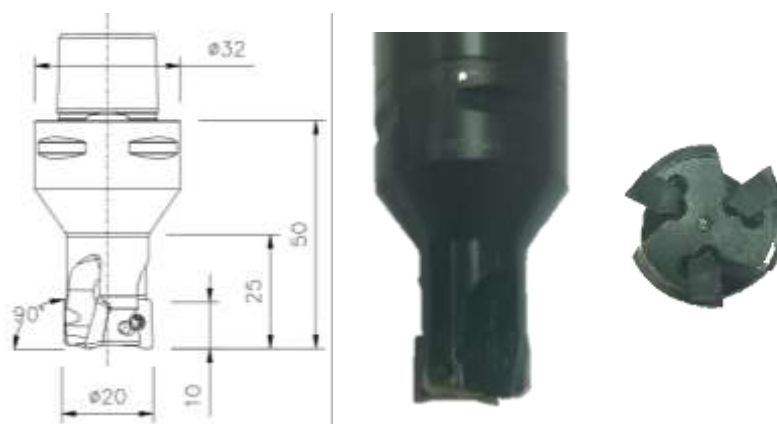


Рисунок 3.6 – Фреза CoroMill R390

– монолитная твердосплавная радиусная фреза YG-1 GMG19910 12(R3) x 12 x 48 x 120, диаметром $D = 12$ мм; имеющая шесть режущих кромок $Z = 6$ (рисунок 3.7);

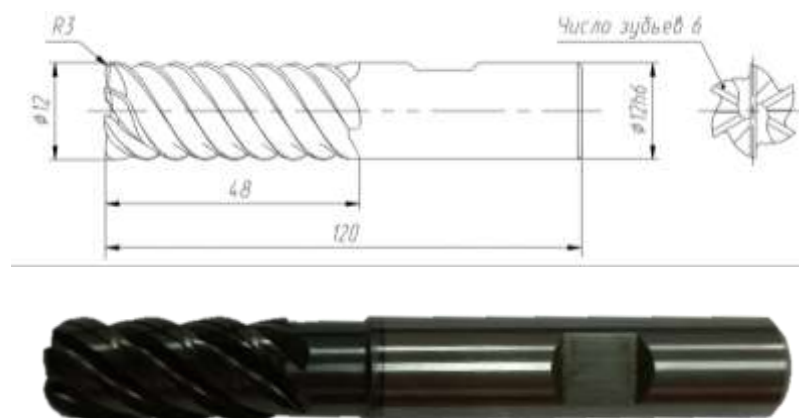


Рисунок 3.7 – Фреза YG-1 GMG19910

– монолитная твердосплавная концевая фреза ФКЦ 4321 16 x 26 x 82 x 16 HF 301 AlTiSiN (рисунок 3.8), изготовленная в соответствии с ТУ 3918-011-88213850-2010, диаметром $D = 16$ мм, имеющая четыре режущих кромки $Z = 4$.

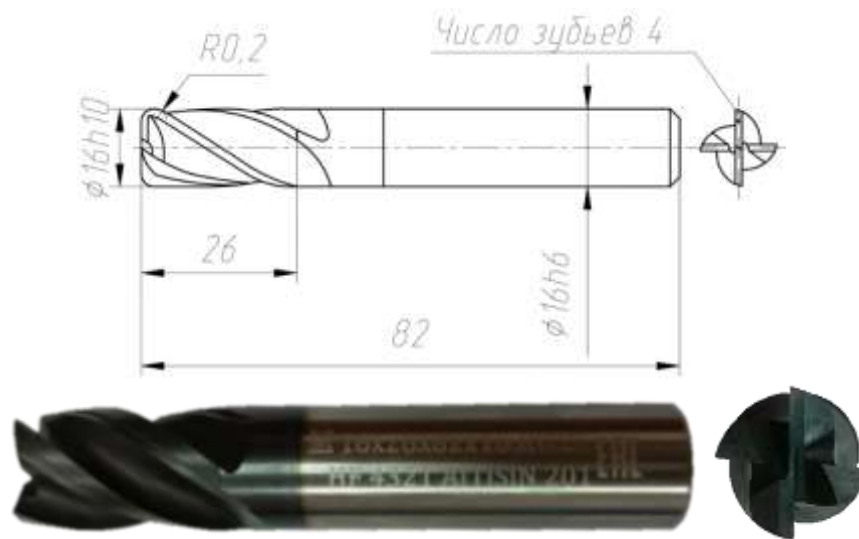


Рисунок 3.8 – Фреза ФКЦ 4321

Для проведения экспериментов в условиях воздействия реальных тепловых нагрузок в процессе резания, а также в исследовании качества получаемой поверхности использовалось два вида инструментов – сборный (рисунок 3.6) и монолитный (рисунок 3.7).

Для подтверждения работоспособности динамической математической модели формирования шероховатости поверхности, а также для проведения эксперимента по выявлению «огранки» была выбрана концевая монолитная фреза с минимальным радиусом на режущей кромке (рисунок 3.8).

Выбор перечисленного выше инструмента обоснован классической конструкцией, позволяющей использовать инструмент не только для ортогонального фрезоточения наружных диаметров заготовки, а также для обработки опорных плоскостей хвостовика, что невозможно при использовании фрез специальных конструкций. Кроме того, использование стандартного инструмента удешевляет стоимость изготовления изделий в условиях реального производства.

Для охлаждения зоны резания применялась смазочно-охлаждающая жидкость Blasocat 2000. Режим «сухого» резания применялся при измерении температуры в зоне резания, т.к. смазочно-охлаждающая жидкость препятствует объективному контролю температуры.

Общий вид зоны обработки с выбранным блоком, заготовкой и инструментом приведен на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Общий вид зоны обработки

Для создания движения поперечной подачи S_z во время процесса фрезоточения необходимо перемещать инструмент в направлении, параллельном оси вращения детали. При этом скорость резания v будет зависеть от частоты вращения детали $n_{\text{заг}}$. Осевая ширина резания $B_{\text{ос}}$ регулируется величиной перемещения фрезы в радиальном направлении.

3.3.2 Выбор режущего инструмента для исследования обрабатываемости

Для исследования обрабатываемости быстрорежущих сталей определены отечественные проходные упорные резцы с напайными пластинами из твердого сплава 2103-0022 ВК8 ГОСТ 18879-73 (рисунок 3.10).



Рисунок 3.10 – Проходные упорные резцы с напайными пластинами из твердого сплава BK8 с измененным задним углом:

а) – $\alpha = 2^\circ$; б) – $\alpha = 4^\circ$; в) – $\alpha = 6^\circ$; г) – $\alpha = 8^\circ$

Выбор такой конструкции аргументирован простотой переточки заднего и переднего угла резца. Передний угол γ был постоянным и составлял 2° , угол в плане $\varphi = 90^\circ$, задний угол $\alpha = 2^\circ$ (рисунок 3.10а), $\alpha = 4^\circ$ (рисунок 3.10б), $\alpha = 6^\circ$ (рисунок 3.10в), $\alpha = 8^\circ$ (рисунок 3.10г), $\alpha = 10^\circ$ (на рисунке не показан).

3.4 Режимы резания для проведения исследования

3.4.1 Режимы резания для ортогонального фрезоточения фрезой со сменными многогранными пластинами

При определении пределов режимов резания для ортогонального фрезоточения необходимо учитывать рекомендации производителя режущего инструмента Sandvik Coromant, свойств инструментального материала сменных пластин 4240 для фрезерования быстрорежущей стали Böhler S390, а также измеренные твердости обрабатываемых поверхностей. Режимы резания при ортогональном фрезоточении быстрорежущей стали Böhler S390 для фрезы R390-020C3-11M050 со сменными многогранными пластинами R390-11 T3 31E-PM (см раздел 3.3.1) должны быть следующими: скорость резания $v = 160..150..145$

м/мин; подача на зуб $S_z = 0,08..0,2$ мм/зуб; глубина резания принята $t = 1..3$ мм; осевая ширина фрезерования принята $B_{oc} = 1,5$ мм.

3.4.2 Режимы резания для ортогонального фрезоточения монокристаллической твердосплавной фрезой

С учетом рекомендаций производителя режущего инструмента YG-1 и измеренных твердостей обрабатываемых поверхностей, для фрезоточения быстрорежущей стали Böhler S390 монокристаллической твердосплавной радиусной фрезой YG-1 GMG19910 (см раздел 3.3.1) режимы резания должны быть следующими: подача на зуб $S_z = 0,105$ мм/зуб; скорость резания $v = 100$ м/мин; глубина резания принята $t = 1..3$ мм; осевая ширина фрезерования принята $B_{oc} = 1,5$ мм.

Рекомендуемые режимы резания производителя для обработки быстрорежущих сталей в состоянии поставки, ориентированные на обеспечение износостойкости монокристаллической радиусной фрезы ФКЦ 4321 (см раздел 3.3.1), должны быть следующими: подача на зуб $S_z = 0,04$ мм/зуб; скорость резания $v = 45..65$ м/мин; глубина резания $t = 2..6$ мм; осевая ширина фрезерования принята $B_{oc} = 1..2$ мм.

3.4.3 Режимы резания для токарной обработки

Для исследования обрабатываемости быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП проходными упорными резцами с напайными пластинами из твердого сплава с 2103-0022 BK8 ГОСТ 18879-73 (см. раздел 3.3.2) определены режимы резания для обоих материалов. Подача назначалась в диапазоне $S = 0,1..0,2$ мм/об; скорость резания была постоянной и составляла $v = 90$ м/мин; глубина резания $t = 3$ мм.

3.5 Средства измерения для проведения исследования

В этом разделе рассмотрены методы и устройства для определения характеристик процесса металлообработки, включая шероховатость поверхности, температуру в зоне резания, отклонения формы типа «огранка» и силы резания.

3.5.1 Прибор для измерения шероховатости поверхности

Оценка шероховатости может проводиться несколькими различными способами, в качестве основного для измерения шероховатости поверхности исследуемых заготовок выбран щуповой метод.

Щуповой метод – это контактный метод, при котором измерения проводятся с использованием контактного профилометра. Контактный профилометр – это измерительный инструмент, конструкция которого включает в себя чувствительный датчик с тонкой, острой, алмазной иглой. Алмазная игла соприкасается с поверхностью и перемещается параллельно ей. В точках, где встречаются микронеровности, происходят механические колебания головки иглы, затем колебания передаются на датчик, который преобразует механическую энергию колебаний в электрический сигнал. Далее этот сигнал поступает на обработку и преобразование в электронные блоки, параметры записанного сигнала точно отражают неровности на шероховатой поверхности исследуемого объекта. После завершения измерения прибор покажет значение шероховатости в выбранных диапазонах.

Для проверки адекватности математической модели в главе см. 2.3.1 оценка шероховатости поверхности заготовок из быстрорежущей стали может выполняться с помощью контактного профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200 (рисунок 3.11а) с использованием щупа (рисунок 3.11б) и параметрами шероховатости, стандартизированными по ГОСТ 2789-73.

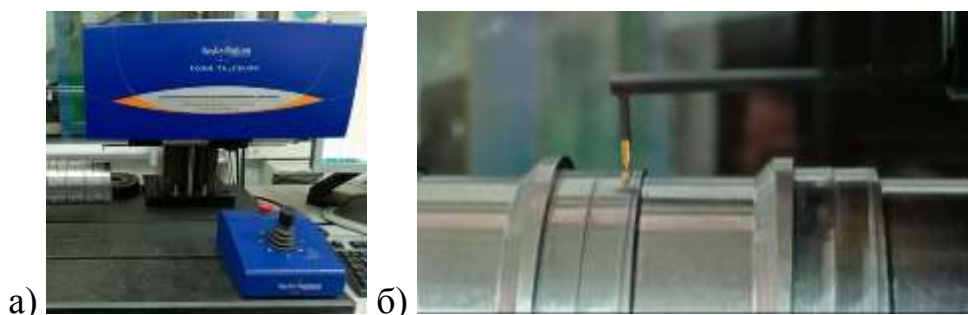


Рисунок 3.11 – Контактный профилометр Taylor Hobson Form Talysurf i200:

а) – общий вид; б) – щуп с алмазным наконечником

Технические параметры контактного профилометра указаны в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Технические параметры контактного профилометра Taylor Hobson Form Talysurf

Параметр	Единица измерения	Величина
Максимальная длина трассы	мм	200
Минимальная длина трассы	мм	0,1
Скорость холостого перемещения	мм/с	10
Скорость измерения	мм/с	0,1
Шаг дискретизации	мкм	0,125
Непрямолинейность направляющей	мкм	0,75
Разрешающая способность	нм	16 нм на диапазоне 1 мм, 3 нм на диапазоне 0,2 мм
Собственный шум	нм	15 нм
Неопределенность измерения параметров шероховатости	%	2% + 4 нм (только для высотных)

3.5.2 Прибор для измерения температуры в зоне резания

Температура в зоне резания может измеряться с помощью различных приборов, таких как инфракрасные термометры, термопары и пирометры. Для проверки адекватности математической модели в главе см. 2.3.2 измерение температуры в зоне резания, производится с помощью тепловизионной камеры, модели Flir Orion серии SC7000M (рисунок 3.12). Тепловизор Flir Orion серии SC7000M – это многоспектральное устройство, способное выдавать тепловые изображения с частотой видео в коротковолновой, средневолновой и длинноволновой областях инфракрасного спектра. Тепловое излучение изучаемого объекта фиксируется объективом, спроектированным таким образом, чтобы минимизировать искажения во всем инфракрасном спектре [80].



Рисунок 3.12– Тепловизионная камера Flir Orion

Упрощенно тепловизор состоит из оптической системы, фокусирующей тепловой поток от объекта на чувствительный элемент – приемник инфракрасного излучения, и блока усиления для представления термограммы объекта в виде, удобном для анализа. Благодаря бесконтактному измерению излучения в инфракрасном диапазоне камера позволяет получать данные температуры с максимальной чувствительностью и точностью [80]. Расположение заготовки, оснастки и инструмента показаны на рисунке 3.13. Таблица 3.5 содержит основную информацию о технических параметрах тепловизионной камеры.



Рисунок 3.13– Тепловизионная камера Flir Orion установленная перед проведением эксперимента

Таблица 3.5 – Технические параметры тепловизионной камеры Flir Orion

Параметр	Единица измерения	Величина
Тип детектора	–	МСТ
Спектральный диапазон	мК	3..5; 8..12
Поле зрения / минимальное фокусное расстояние	°	30; 25; 20; 15
Размер матрицы	рх	640 x 512
Температурная чувствительность	мК	менее 18 мК при + 30 °С
Частота обновления кадров	Гц в полнокадровом режиме	380
Фокус	–	ручной
Интервал температур	°С	от -20 до + 3000 в нескольких диапазонах
Точность	%	± 1% от абсолютной температуры не хуже ± 1 °С
Калибровка	–	постоянная, с настраиваемым температурным диапазоном и временем интегрирования благодаря функции HiperCal

В ходе проведения измерений необходимо фиксировать следующие параметры, достигнутые в процессе обработки:

- минимальная температура;
- максимальная температура;
- средняя температура: сумма максимальной и минимальной температуры в исследуемой зоне, деленная на два.

3.5.3 Прибор для измерения «огранки» цилиндрической поверхности

Основными методами оценки отклонения от круглости («огранки») являются:

- измерение на призме;
- измерение на кольце;
- оптический метод измерения.

Схема измерения «огранки» зависит, в первую очередь от четности или нечетности числа граней. «Огранку» с четным числом граней измеряют по тем же схемам, что и овальность, и легко выявляют при повороте детали. Измерительные головки для этих измерений выбирают исходя из допустимого значения «огранки». При контроле на призме (рисунок 3.14а) величина «огранки» определяется пересчетом показания отсчетной головки с учетом числа граней и угла призмы (согласно рекомендаций МИ 1927-88). «Огранку» детали также можно измерить с помощью отверстия кольца диаметром, равным наибольшему предельному размеру детали (рисунок 3.14б). Для этого в условиях мелкосерийного производства рекомендуется использовать регулируемые кольца, а для крупносерийного и массового производства – приспособление с отверстием постоянного диаметра. «Огранку» также оценивают по наибольшей разности показаний измерительной головки.

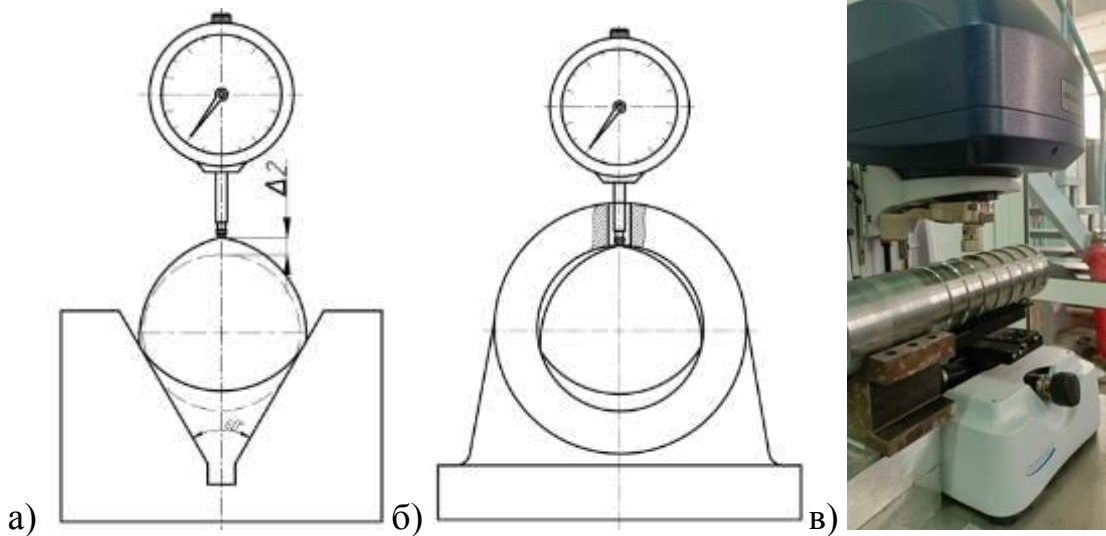


Рисунок 3.14 – Методика измерения «огранки»:

а) – на призме; б) – в кольце; в) – оптическим методом

Однако в связи с большим количеством граней (расчетное количество пиков граней в зависимости от режимов резания и диаметра составляет 416...899 шт.), в целях оптимизации времени и повышения точности измерения «огранки» необходимо производить с использованием оптического профилометра. Для проверки адекватности математической модели в главе см. 2.3.3 определение огранки производилось оптическим профилометром Bruker Contour GT-K1 (рисунок 3.14в). Технические параметры профилометра приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Технические параметры оптического профилометра ContourGT-K1

Параметр	Единица измерения	Величина
Метод измерения	–	Вертикальная сканирующая интерферометрия (в белом свете) и фазовая интерферометрия
Длина основания	мм	150
Тип перемещения основания	–	Моторизованное и программируемое, наклон основания $\pm 6^\circ$
Наклон основания	$^\circ$	± 6
Тубусные линзы	–	0.55x, 0.75x, 1.0x, 1.5x, 2.0x
Объективы (парфокальные)	–	1,5x, 2,5x, 5x, 10x, 20x, 50x, 100x
Программное обеспечение	–	Vision64 для управления профилометром и анализа изображений
Скорость вертикального сканирования	мкм/с	28

Было осуществлено сканирование линзой IX5 на участках размерами 1,7x2,3 мм, результатом которого стало облако точек, повторяющее микронеровности цилиндрического профиля измеренного участка заготовки. Для измерения «огранки» необходимо применять фильтр «выравнивание» в

программном обеспечении Vision64 для корректировки цилиндричности и наклона заготовки, возникающих из-за погрешностей в установке. Полученные в результате оптических измерений топографии поверхности (рисунок 3.15) позволяют выявить и измерить «огранку», возникающую при обработке методом ортогонального фрезоточения.

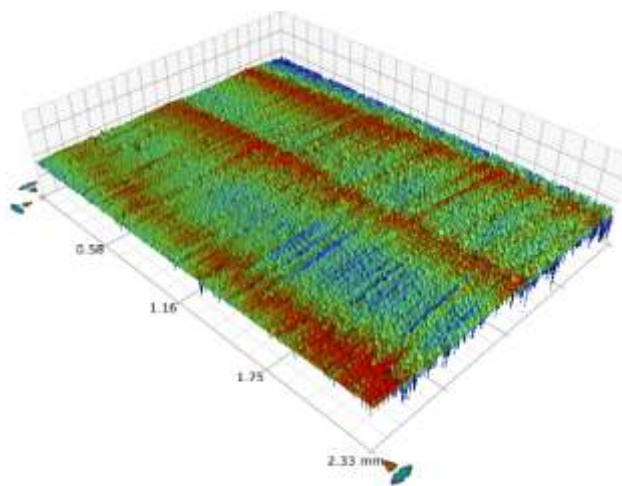


Рисунок 3.15 –Топография поверхности под 5-ти кратным увеличением

3.5.4 Прибор для измерения сил резания

Для проведения измерений сил резания используется прибор, отвечающий предъявляемым требованиям по точности и достоверности результатов измерений, а также учитывающий конструктивные особенности станка, выбранного для выполнения исследования. Наиболее распространен метод непосредственного измерения сил резания при помощи динамометров. Для проверки адекватности математической модели в главе см. 2.3.4 применяется трехкомпонентный стационарный динамометрический комплекс Kistler Type 9129AA (рисунок 3.16), который обладает преимуществом в виде высокой точности при любой позиции инструмента относительно заготовки [42]. Этот комплекс способен измерять компоненты силы резания P_x , P_y и P_z в процессе резания.



Рисунок 3.16 – Динамометр для токарных станков
Kistler 9129AA в сборе с резцом

Технические данные трехкомпонентного динамометра для токарных станков Kistler 9129AA представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Технические данные динамометра Kistler 9129AA

Параметр	Ось	Единица измерения	Величина
Перегрузка	P_x, P_y, P_z	%	20
Порог	–	Н	< 0,01
Номинальная чувствительность	P_x	pC/Н	$\approx - 8$
	P_y	pC/Н	$\approx - 4,1$
	P_z	pC/Н	$\approx - 8$
Отклонение чувствительности (зависящее от адаптера)	P_x, P_y, P_z	%	$\leq + 1$
Собственная частота	$f_n(x)$	кГц	$\approx 1,5$
	$f_n(y)$	кГц	$\approx 1,5$
	$f_n(z)$	кГц	$\approx 2,5$
Диапазон рабочих температур	–	°C	0..70

Продолжение таблицы 3.7

Масса динамометра	–	кг	3,2
Масса пластины	–	кг	2
Габаритные размеры	–	мм	107 x 150
Подключение	–	–	Фланец Фишера 9-контактный отрицательный

Для установки инструмента необходимо использовать держатель, позволяющий закрепить его в ротационном динамометре. Рабочая зона станка с установленными датчиками и инструментом приведена на рисунке 3.17.

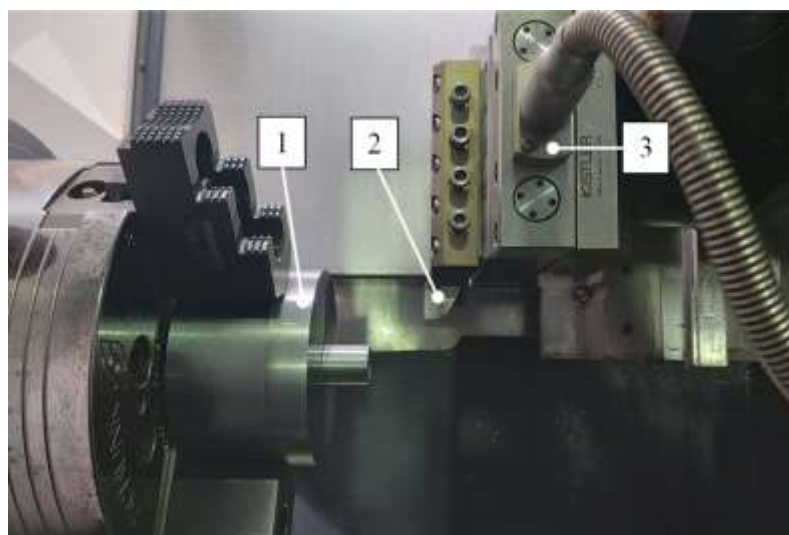


Рисунок 3.17 – Рабочая зона станка с установленным динамометром

Под рабочей зоной станка понимается: заготовка 1, установленная в патрон, токарный резец 2, установленный в динамометр 3, который закрепляется в револьверной головке станка.

Для сбора и анализа данных при силовом анализе производителями приборов предлагается использовать многоцелевое программное обеспечение DynoWare. Программное обеспечение разработано с целью создания измерительного комплекса на основе хорошо зарекомендовавшей себя линейки

кварцевых динамометров фирмы Kistler и их использования совместно с современной компьютерной техникой [42].

3.6 Выводы по третьей главе

В результате проведения разработки методов и выбора средств для осуществления исследований представленных в главе 3, сформулированы следующие выводы:

1. В качестве объекта исследования определен технологический процесс механообработки инструмента из быстрорежущей стали на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 с приводными блоками;

2. Для проведения эксперимента выбран токарный обрабатывающий центр, обладающий высокой точностью, и приводные блоки, позволяющие производить обработку концевыми фрезами перпендикулярно к оси детали с возможной скоростью вращения на данном станке $n_{и}$ до 4500 об/мин. Это позволяет выполнить полноценную реализацию кинематической схемы ортогонального фрезоточения;

3. В качестве материала заготовок выбраны стали марок Böhler S390 MICROCLEAN, P6M5K5-МП, полученные методом порошковой металлургии; сталь марки P6M5K5, полученная обычным методом. Выбор марок материала определен на основе потребностей реального инструментального производства, что обеспечивает практическую значимость проводимого исследования;

4. В ходе проведения анализа режущего инструмента определено, что данные инструменты, перечисленные ниже, обеспечивают высокую эффективность при выполнении операции ортогонального фрезоточения:

– фреза для обработки прямоугольных уступов Sandvik Coromant CoroMill R390 диаметром $D = 20$ мм, оснащенная тремя сменными многогранными пластинами;

– монолитная твердосплавная радиусная фреза YG-1 GMG19910 $D = 12$ мм;

– монолитная твердосплавная фреза ФКЦ 4321 $D = 16$ мм;

5. Определена методика применения измерительного оборудования в рамках исследований на основе анализа точностных параметров и формата выходных данных, что позволит объективно оценить результаты исследований.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ НА ВЫХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

На базе разработанных и адаптированных математических моделей в главе 2, по разработанным в главе 3 методам и выбранному оборудованию, оснащению, режущим инструментам и средствам измерения проведены экспериментальные исследования влияния режимов резания ортогонального фрезоточения на выходные параметры.

Для оценки влияния режимов резания на качество обработанной поверхности (шероховатость, «огранку»), температуру в зоне резания, была проведена серия лабораторных испытаний при ортогональном фрезоточении быстрорежущих сталей. Для исследования влияния сил резания на обрабатываемость быстрорежущих сталей проводились лабораторные испытания при продольном точении заготовок, полученных литьем и порошковым методом.

Для планирования эксперимента был использован трехуровневый план Бокса-Бенкена, который представлен в разделах 4.1.1, 4.1.2 и 4.2.1, 4.2.2 данной работы. Для полноты определения коэффициентов регрессии, варьирование факторов рассматривалось на трех уровнях, и предусматривает проведение 15 опытов в каждом исследовании [70].

Планирование экспериментов в соответствии с планом Бокса-Бенкена включает в себя несколько этапов:

1. Определение уровней варьирования факторов;
2. Кодирование значений факторов;
3. Планирование эксперимента;
4. Проведение эксперимента;
5. Проведение расчетов для уравнения регрессии в кодированных переменных;
6. Расчет коэффициентов регрессии;
7. Проверка адекватности модели.

В работе было введено обозначение верхнего предельного значения фактора +1, нижнего -1, а номинального – 0.

Также в разделе 4.3 используется метод Тагучи, зарекомендовавший себя в исследованиях в качестве надежного инструмента для анализа параметров резания [39, 49, 62, 64]. В работе была использована ортогональная матрица Тагучи с 4 факторами и 3 уровнями для исследования влияния всех параметров обработки с помощью небольшого числа экспериментов, что позволяет сократить время и ресурсы для проведения экспериментальных исследований. В соответствии с составленным планом экспериментов, было проведено 9 опытов.

4.1 Исследование влияния режимов резания и типа инструмента на шероховатость поверхности

В работе проводится анализ зависимости отклонения шероховатости поверхности Ra от глубины резания t , скорости резания v и подачи S_z с применением математической модели адаптированной в разделе 2.3.1. Для измерения параметров шероховатости использован профилометр выбранный в разделе 3.5.1, определена длина трассы измерения в 8,1 мм.

4.1.1 Исследование шероховатости поверхности с применением фрезы со сменными многогранными пластинами

Основная цель эксперимента заключалась в определении влияния технологических параметров на шероховатость поверхности при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами инструмента для операции ортогонального фрезоточения.

Обработка производилась фрезой R390-020C3-11M050 со сменными многогранными пластинами R390-11 T3 31E-PM (см. раздел 3.3.1), по режимам резания указанным в разделе 3.4.1.

Кодирование переменных осуществляется по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\ln S_z + \ln S_{zmax})}{\ln S_{zmax} - \ln S_{zmin}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\ln v + \ln v_{max})}{\ln v_{max} - \ln v} + 1; \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$x_3 = \frac{2(\ln t + \ln t)}{\ln t_{ocmax} - \ln t_{ocmin}} + 1.$$

Таблица 4.1 содержит информацию об верхних $(S_{zmax}, v_{max}, t_{max})$, основных (S_{z0}, v_0, t_0) и нижних $(S_{zmin}, v_{min}, t_{min})$ уровнях.

Таблица 4.1 – Значение уровней факторов эксперимента по определению влияния технологических параметров на шероховатость поверхности, при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

Фактор	Единицы измерения	Кодированное значение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
				Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
S_z	мм/зуб	x_1	0,04	0,08	0,12	0,16
v	м/мин	x_2	30	150	180	210
t	мм	x_3	1	1	2	3

Планирование эксперимента осуществлялось с использованием некомпозиционного плана, предложенного Боксом и Бенкиным. После обработки выполнен анализ шероховатости полученной поверхности, результаты отражены в таблице 4.2. В данной таблице также приведена матрица плана эксперимента исследования шероховатости поверхности с применением фрезы со сменными многогранными пластинами.

Таблица 4.2 – Матрица результатов планирования эксперимента по определению влияния технологических параметров на шероховатость поверхности, при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

№ опыта	Входные факторы										Результат
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_{12}	x_{22}	x_{32}	
1	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	3,32
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	3,28

Продолжение таблицы 4.2

3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	3,52
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	4,95
5	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	1,73
6	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	1,81
7	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	4,16
8	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	3,29
9	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	1,79
10	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	2,07
11	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	4,40
12	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	3,04
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4,33
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,37
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,23

Для расчета вектора коэффициентов и определения их значимости используется программный комплекс «Statistica 10.0», где для расчетов используется метод наименьших квадратов:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y, \quad (4.2)$$

где X – матрица планирования эксперимента;

Y – результат исследуемой величины в экспериментах при фрезоточении, содержащий значения отклика зависимой величины в логарифмическом масштабе.

Дисперсии коэффициентов регрессии $S^2(b_j)$ находятся из выражения:

$$S^2(b_j) = c_{ii} S_y^2, \quad (4.3)$$

где c_{ii} – диагональные элементы матрицы XX^{-1} ;

$S^2 y$ – дисперсия эмпирической регрессии.

Среднее значение (4.4) и дисперсия опыта (4.5) находятся при помощи вектором опытов в центре плана.

$$y := \frac{\sum_{i=0}^2 Y_{ui}}{3}, \quad (4.4)$$

где Y_u – вектор значений функции отклика в центре плана.

$$S_y^2 := \frac{\sum_{i=0}^2 (Y_{ui} - y)^2}{2}. \quad (4.5)$$

где S_y – дисперсия j -го опыта матрицы.

По результатам опытов, выполненных согласно плану (таблица 4.2), уравнение регрессии, полученное на основе проведенных экспериментов, записывается в виде:

$$y = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2; \quad (4.6)$$

$$b_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (4.7)$$

$$b_i = A \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (4.8)$$

$$b_{il} = D \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (4.9)$$

$$b_3 = B \sum_{u=1}^N x_{ij}^2 y_j + C \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{p \cdot n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (4.10)$$

где n_0 – число опытов в центре плана;

u – номер параллельного опыта в центре плана;

y_{0u} – значение функции отклика в u -ом опыте;

N – число опытов в матрице планирования;

j – номер опыта в матрице планирования;

i, l – номера факторов;

x_{ij}, x_{lj} – кодированные значение i -го и l -го факторов в j -м опыте;

y_j – значение функции отклика в j -м опыте,

из этого следует:

$$b_0 = 1,11667; \quad b_1 = -1,62500; \quad b_2 = -0,03704; \quad b_3 = -0,91917; \quad b_{11} = 14,58333;$$

$$b_{22} = 0,00011; b_{33} = 4,6.$$

Сформулированная модель в разделе 2.3.1, описывающая зависимость отклонений шероховатости поверхности в зависимости от параметров обработки и глубины резания, будет выглядеть следующим образом:

$$Ra = 1.11667 + S_z \cdot (14.58333 \cdot S_z - 1.62500) + v \cdot (0.00011 \cdot v - 0.03704) + t \cdot (4.6 - 0.91917 \cdot t). \quad (4.11)$$

Проверка адекватности модели проводится на основании критерия Фишера путем подстановки вектора расчетных значений в предварительно полученную формулу.

Формула, указанная ниже (4.12), позволяет вычислить дисперсию воспроизводимости:

$$S_E^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_j)^2}{N(n-1)}, \quad (4.12)$$

где y_i – математическое ожидание в i -м опыте;

N – число параллельных опытов;

\bar{y}_j – среднее арифметическое значение выходного параметра из n параллельных опытов в j -й точке матрицы планирования.

Чтобы определить число степеней свободы воспроизводимости, необходимо просуммировать число степеней свободы каждой дисперсии на всех проведенных опытах в соответствии с уравнением (4.13):

$$f_E = \sum_{j=1}^N (n_j - 1). \quad (4.13)$$

Следовательно, если число степеней свободы дисперсии воспроизводимости f_E равно 2, то дисперсия воспроизводимости (4.12) равна 0,28.

Формула для определения числа степеней свободы дисперсии адекватности является разностью между общим числом проведенных опытов N и числом постоянных коэффициентов m , содержащихся в уравнении регрессии (4.14):

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - f(x_j))^2}{N-m}. \quad (4.14)$$

Данные для расчета приведены в таблице 4.3.

Следовательно, дисперсия адекватности, определяемая по формуле (4.14), будет равна $S_{ад}^2 = 0,78$.

Таблица 4.3 – Результаты проведения эксперимента по определению влияния технологических параметров на шероховатость поверхности, при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

№ опыта	Значение факторов			Результат			
	S_z , мм/зуб	v , м/мин	t , мм	Полученные значения $y_{ij} Ra$, мкм	Предсказанные значения $\bar{y}_j Ra$, мкм	$y_i - \bar{y}_j$	$(y_i - \bar{y}_j)^2$
1	0,08	150	2	3,32	3,52	-0,2	0,04
2	0,16	150	2	3,28	3,67	-0,39	0,1521
3	0,08	210	2	3,52	3,67	-0,15	0,0225
4	0,16	210	3	4,95	3,83	1,12	1,2544
5	0,08	180	1	1,73	1,66	0,07	0,0049
6	0,16	180	1	1,81	1,81	0	0
7	0,08	180	3	4,16	3,50	0,66	0,4356
8	0,16	180	3	3,29	3,65	-0,36	0,1296
9	0,12	150	1	1,79	1,73	0,06	0,0036
10	0,12	210	1	2,07	1,88	0,19	0,0361
11	0,12	150	3	4,40	3,58	0,82	0,6724
12	0,12	210	3	3,04	3,73	-0,69	0,4761
13	0,12	180	2	4,33	3,55	0,78	0,6084
14	0,12	180	2	3,37	3,55	-0,18	0,0324
15	0,12	180	2	3,23	3,55	-0,32	0,1024

Дисперсии адекватности и воспроизводимости будут однородными, если выполняется условие:

$$F < F_{табл}, \quad (4.15)$$

где $F = \frac{S_{ад}^2}{S_E^2}$,

$F_{\text{табл}}$ – табличное значение критерия Фишера.

Табличное значение критерия Фишера, для данного случая, составляет 3,88.

В процентном отношении отклонение векторов, результатов модели и исходных данных серии экспериментов при фрезоточении составляет допустимую величину равную $2,75 < 3,88\%$.

Это доказывает, что дисперсии адекватности и воспроизводимости являются однородными, и на уровне доверительной вероятности $P = 0,95$ можно сделать вывод о том, что уравнение регрессии (4.11) адекватно.

Разница между экспериментальными значениями функции отклика и ее расчетными значениями равна среднему разбросу результатов повторных измерений в каждом эксперименте относительно их математических ожиданий, как показано на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – График сходимости измеренной и рассчитанной шероховатости поверхности

Качество обработанной поверхности оценивалось параметром шероховатости Ra , с использованием контактного профилометра, указанного в разделе 3.5.1. В качестве примера результатов измерений на рисунке 4.2 приведена профилограмма поверхности полученная при измерении в опыте №5.

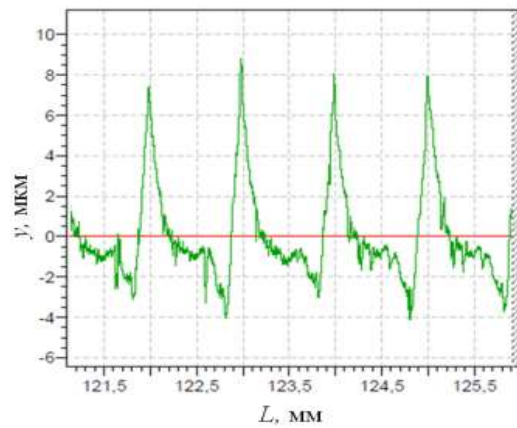


Рисунок 4.2 – Профилограмма поверхности (опыт №5)

Измеренные микропрофили поверхности, после проведения эксперимента с использованием фрезы со сменными многогранными пластинами R390-020C3-11M, приведены в приложении А в таблице А.1.

Поверхности отклика параметра шероховатости обработанной поверхности в зависимости от режимов обработки представлены на рисунке 4.3.

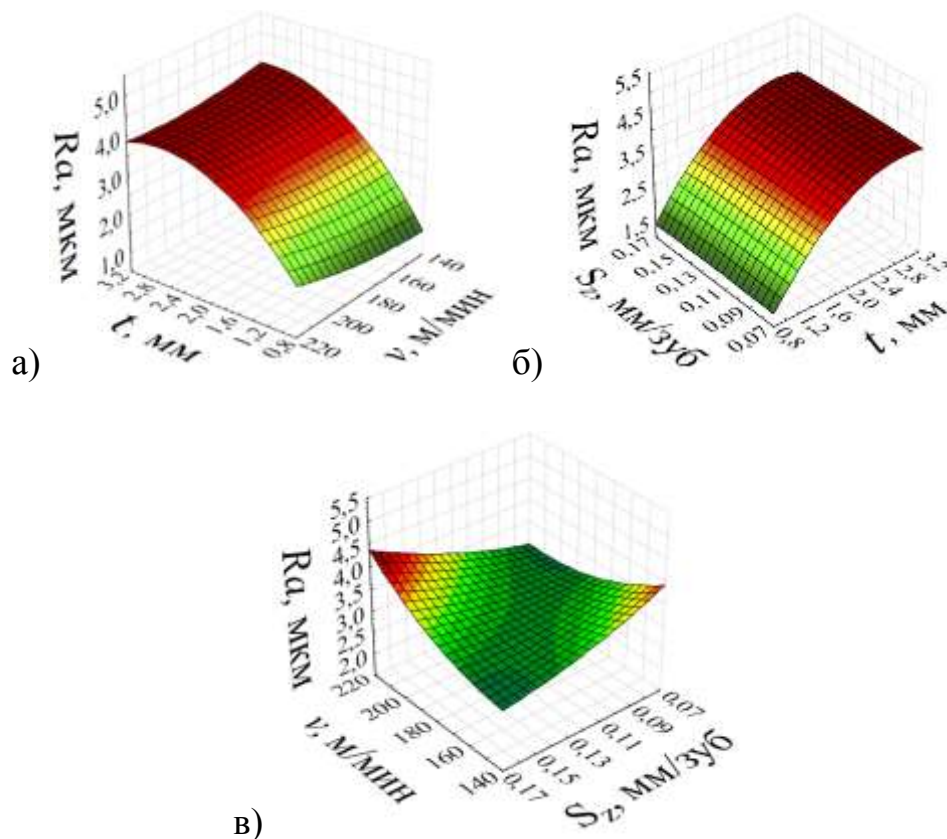


Рисунок 4.3 – Зависимости отклонения параметра шероховатости Ra :
 а) – от скорости резания v и глубины резания t ; б) – от подачи на зуб S_z и глубины резания t ; в) – от подачи инструмента S_z и скорости резания v

Анализ полученных зависимостей показывает, что шероховатость поверхности линейно возрастает при увеличении подачи S_z (рисунок 4.3а, 4.3в). Это позволит назначить оптимальную, с точки зрения производительности обработки, подачу инструмента для достижения заданной шероховатости поверхности. Это соответствует основным положениям классической теории резания.

Изменение скорости резания v не оказывает существенного влияния на шероховатость (рисунок 4.3а, 4.3в). Однако при увеличении скорости резания v до 200..220 м/мин можно заметить некоторое ухудшение качества поверхности. Это можно объяснить тем, что при фрезеровании с указанными скоростями резания v имеет место эффект нароста материала. При этом данное ухудшение качества поверхности не является критичным, так как шероховатость отвечает стандартным требованиям чистовой обработки.

Зависимость шероховатости от глубины резания t имеет линейный характер в диапазоне $t = 0,8..2$ мм, приобретая гиперболический характер при увеличении t от 2 до 3,2 мм (рисунок 4.3а, 4.3б). Важно отметить, что при увеличении t растет производительность обработки, в данном случае в 1,6 раза. При этом шероховатость находится в пределах $R_a=3,2..3,5$ мкм, что соответствует стандартным требованиям к качеству поверхности при чистовой обработке.

В результате установки определенных режимов резания удалось достичь удовлетворительной шероховатости поверхности при сохранении производительности процесса.

4.1.2 Исследование шероховатости поверхности с применением монолитной твердосплавной фрезы

Основная цель эксперимента заключалась в определении влияния технологических параметров на шероховатость поверхности при использовании монолитной твердосплавной фрезы в качестве режущего инструмента для операции ортогонального фрезоточения.

Обработка производилась монолитной радиусной фрезой YG-1 GMG19910 (см. раздел 3.3.1), по режимам резания указанным в разделе 3.4.2.

Эксперимент включал несколько этапов: кодирование факторов, планирование эксперимента, его проведение и проверку адекватности модели.

Кодирование переменных осуществляется по соотношениям, представленным в разделе 4.1.1 аналогичным образом. Таблица 4.4 содержит информацию об верхних $(S_{z_{max}}, v_{max}, t_{max})$, основных (S_{z_0}, v_0, t_0) и нижних $(S_{z_{min}}, v_{min}, t_{min})$ уровнях.

Таблица 4.4 – Значение уровней факторов эксперимента по определению влияния технологических параметров на шероховатость поверхности, при использовании монолитной твердосплавной фрезы, в ортогональном фрезоточении

Фактор	Единицы измерения	Кодированное значение	Интервал варьирования	Уровни факторов		
				Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
S_z	мм/зуб	x_1	0,04	0,04	0,08	0,12
v	м/мин	x_2	10	80	90	100
t	мм	x_3	0,25	1	2	3

В таблице 4.5 приведена матрица плана эксперимента исследования шероховатости поверхности с применением монолитной концевой фрезы.

Таблица 4.5 – Матрица результатов планирования эксперимента по определению влияния технологических параметров на шероховатость поверхности при использовании монолитной твердосплавной фрезы в ортогональном фрезоточении

№ опыта	Входные факторы										Результат
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_{12}	x_{22}	x_{32}	
1	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	0,9487

Продолжение таблицы 4.5

2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	1,5583
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	1,2183
4	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1,7555
5	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	1,5674
6	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	1,9084
7	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	1,5198
8	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1,9505
9	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	1,8912
10	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	1,0914
11	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	1,6132
12	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1,7664
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5668
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5081
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,5046

Вектор коэффициентов определяется по формуле (4.2). Дисперсии $S^2(b_j)$ коэффициентов регрессии находятся из выражения (4.3). Для вычисления среднего значения и дисперсии эксперимента используется вектор, расположенный в центре плана, с использованием формул (4.4-4.5).

При этом математическая модель в кодированных переменных по результатам опытов, проведенных по плану (табл. 4.5), имеет следующий вид (4.16-4.20):

$$y = g_0 \cdot x_0 + g_1 \cdot x_1 + g_2 \cdot x_2 + g_3 \cdot x_3 + g_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + g_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + g_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + g_{11} \cdot x_1^2 + g_{22} \cdot x_2^2 + g_{33} \cdot x_3^2; \quad (4.16)$$

$$g_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (4.17)$$

$$g_i = A \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (4.18)$$

$$g_{il} = D \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (4.19)$$

$$g_3 = B \sum_{u=1}^N x_{ij}^2 y_j + C \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{p \cdot n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (4.20)$$

из этого следует:

$$g_0 = 1,388; g_1 = 0,24; g_2 = -0,022; g_3 = 0,268; g_{11} = 2,413;$$

$$g_{22} = 2,267; g_{33} = 3,072.$$

Таким образом, была разработана модель на базе модели, указанной в разделе 2.3.1, которая описывает зависимость отклонения шероховатости поверхности от параметров обработки и глубины резания. Ее формула представлена в виде (4.21).

$$Ra = 1,388 + 2,413 \cdot S_z^2 - 0,24 \cdot S_z. \quad (4.21)$$

В процентном соотношении отклонение векторов результатов модели и экспериментальных данных составляет 3,1%, что подтверждает адекватность модели и обеспечивает возможность использования полученных зависимостей для прогнозирования шероховатости поверхности (рисунок 4.4).



Рисунок 4.4 – График сходимости измеренной и рассчитанной шероховатости поверхности

Качество обработанной поверхности оценивалось параметром шероховатости Ra , с использованием контактного профилометра, указанного в разделе 3.5.1. В качестве примера результатов измерений на рисунке 4.5 представлена профилограмма поверхности, полученная при измерении в опыте №10.

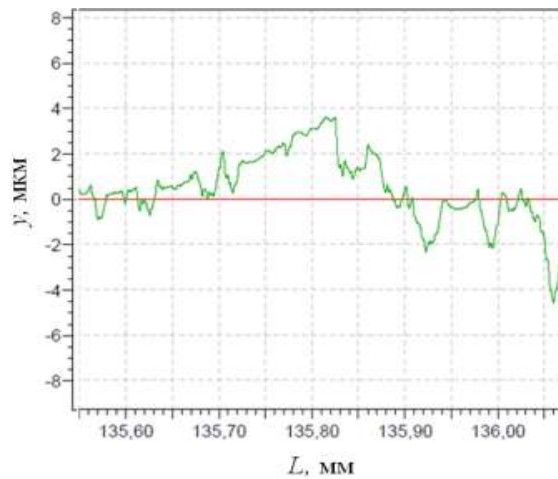


Рисунок 4.5 – Профилограмма поверхности (опыт №10)

На рисунке 4.6 изображены графики поверхностей отклика параметра шероховатости обработанной поверхности в зависимости от различных режимов ортогонального фрезоточения.

Измеренные микропрофили поверхности после проведения эксперимента, с использованием монолитной фрезы ФКЦ 4321 приведены в приложении А в таблице А.2.

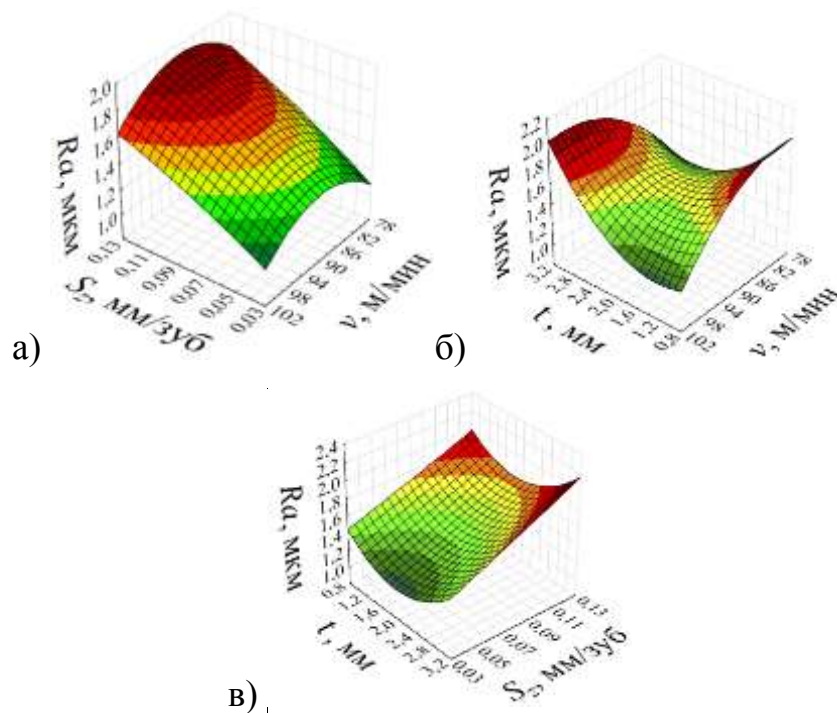


Рисунок 4.6 – Зависимости отклонения параметра шероховатости Ra :
 а) – от скорости резания v и от глубины резания t ; б) – от подачи на зуб S_z и глубины резания t ; в) – от скорости резания v и подачи инструмента S_z

Из полученных данных было выявлено, что зависимость шероховатости поверхности Ra от подачи S_z имеет линейный характер. При увеличении подачи шероховатость увеличивается (рисунок 4.6а, 4.6в). В то же время, скорость резания v и глубина резания t практически не влияют на шероховатость поверхности (рисунок 4.6б). Для достижения заданной шероховатости поверхности можно определять оптимальную подачу инструмента с точки зрения производительности обработки, так как зависимость шероховатости от подачи пропорциональна, что согласуется с основными теоретическими положениями теории резания.

При изменении скорости резания v_c наблюдается параболическая зависимость от уровня шероховатости поверхности, максимумы которой достигаются в диапазоне скоростей резания 90..95 м/мин. Это объясняется тем, что на режущей кромке инструмента в этом диапазоне скоростей резания возникает эффект нароста материала, что и приводит к увеличению шероховатости поверхности.

Зависимость шероховатости от глубины резания имеет параболический характер, но при этом максимальные значения шероховатости достигаются при $t = 0,25..3$ мм, а минимальное значение при $t = 1,8..2,2$ мм.

4.2 Исследование влияния режимов резания на температуру в зоне резания

Основная цель эксперимента заключалась в определении влияния технологических параметров на температуру в зоне резания при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами, в качестве режущего инструмента для операции ортогонального фрезоточения.

В работе представлены результаты анализа зависимости температуры в зоне резания T от постоянной величины осевой ширины резания B_{oc} и переменных значений скорости резания v , глубины резания t и подачи S_z с применением математической модели адаптированной в разделе 2.3.2. Для измерения температуры в зоне резания использовался тепловизор выбранный в разделе 3.5.2.

4.2.1 Исследование влияния температуры в зоне резания с применением фрезы со сменными многогранными пластинами

Для того чтобы установить связь между режимами резания и изменением температуры в зоне резания, для экспериментального проектирования был применен трехуровневый план Бокса-Бенкена. В данной работе определяется зависимость изменения температуры в зоне резания от глубины резания t , скорости резания v и подачи S_z .

Обработка производилась фрезой R390-020C3-11M050 со сменными многогранными пластинами R390-11 T3 31E-PM (см. раздел 3.3.1), по режимам резания указанным в разделе 3.4.1. Измерение температуры производилось тепловизором Flir Orion серии SC7000M (см. раздел 3.5.2). Во время обработки смазочно-охлаждающая жидкость не применялась, т.к. ее применение могло повлиять на правильность результатов измерения температуры в зоне резания.

Кодирование переменных осуществляется согласно раздела 4.1.1. Таблица 4.6 содержит информацию об верхних $(S_{z_{max}}, v_{max}, t_{max})$, основных (S_{z_0}, v_0, t_0) и нижних $(S_{z_{min}}, v_{min}, t_{min})$ уровнях. Матрица плана приведена в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Матрица результатов планирования эксперимента по определению влияния технологических параметров на температуру в зоне резания при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

№ опыта	Входные факторы										Результат
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_{12}	x_{22}	x_{32}	
1	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	93,27
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	120,78
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	104,96
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	127,95
5	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	108,56
6	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	117,51

Продолжение таблицы 4.6

7	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	126,98
8	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	141,58
9	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	102,76
10	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	103,23
11	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	123,93
12	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	134,02
13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	122,64
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	142,77
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	139,36

Вектор коэффициентов определяется по формуле (4.2). Дисперсии $S^2(b_j)$ коэффициентов регрессии находятся из выражения (4.3). Для вычисления среднего значения и дисперсии эксперимента используется вектор, расположенный в центре плана, с использованием формул (4.4-4.5).

По результатам опытов, выполненных согласно плану (таблица 4.6), можно определить постоянные коэффициенты уравнения (4.22-4.26):

$$y = d_0 \cdot x_0 + d_1 \cdot x_1 + d_2 \cdot x_2 + d_3 \cdot x_3 + d_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + d_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + d_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + d_{11} \cdot x_1^2 + d_{22} \cdot x_2^2 + d_{33} \cdot x_3^2; \quad (4.22)$$

$$d_0 = \frac{1}{n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}; \quad (4.23)$$

$$d_i = A \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j; \quad (4.24)$$

$$d_{il} = D \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j; \quad (4.25)$$

$$d_3 = B \sum_{u=1}^N x_{ij}^2 y_j + C \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{p \cdot n_0} \sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}, \quad (4.26)$$

из этого следует:

$$d_0 = 4,763; d_1 = -9,256; d_2 = -3,677; d_3 = -27,8; d_{11} = 176,873; d_{22} = 169,2; d_{33} = 213,105.$$

Таким образом, была адаптирована модель указанная в разделе 2.3.2, которая описывает изменение температуры в зоне резания в зависимости от параметров резания, ее формула представлена в виде (4.27):

$$T = 4,763 + S_z \cdot (18,5125) + v \cdot (15,4279 \cdot 2) + t \cdot (23,6125). \quad (4.27)$$

Преобразовав выражение, получим (4.28):

$$T = e^{4,763} \cdot S_z^{18,5125} \cdot v^{15,4279 \cdot 2} \cdot t^{23,6125}. \quad (4.28)$$

Возьмем логарифм от выражения (4.28):

$$T = \ln(e^{4,763} \cdot S_z^{18,5125} \cdot v^{15,4279 \cdot 2} \cdot t^{23,6125}), \quad (4.29)$$

$$T = 142,111, ^\circ\text{C}$$

В процентном соотношении отклонение векторов результатов модели и экспериментальных данных составляет 2,37%, что подтверждает адекватность модели и обеспечивает возможность использования полученных зависимостей для прогнозирования температуры в зоне обработки (рисунок 4.7).

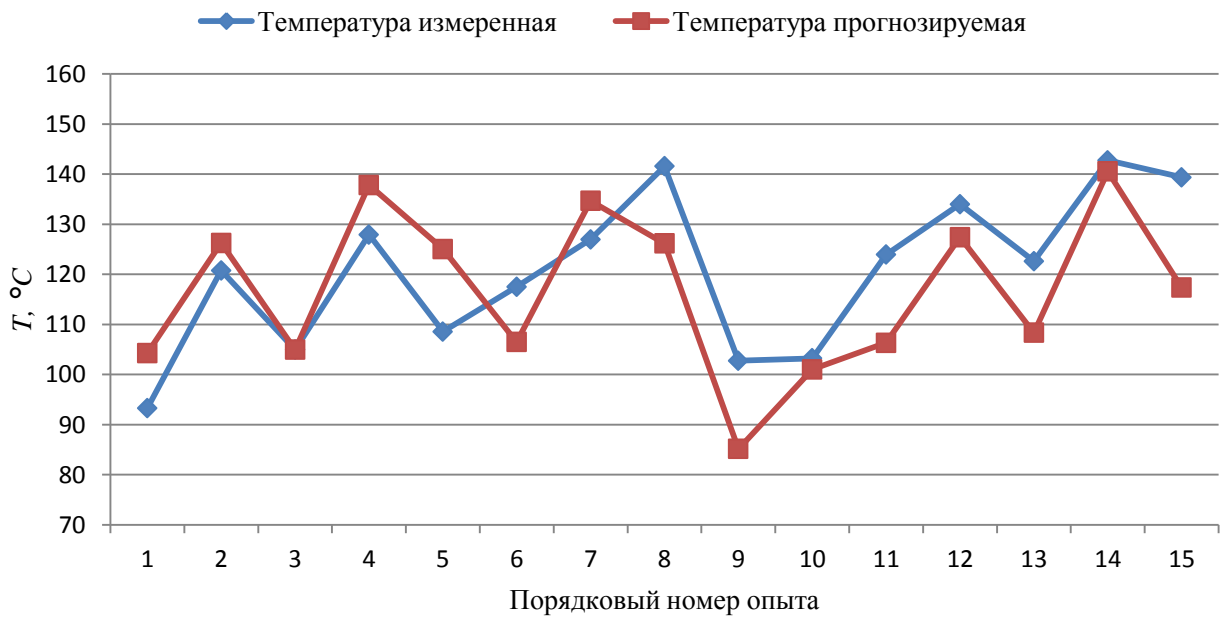


Рисунок 4.7 – График сходимости измеренной и рассчитанной температуры

На рисунке 4.8 изображены графики поверхностей отклика температур в зоне резания в зависимости от различных режимов ортогонального фрезоточения.

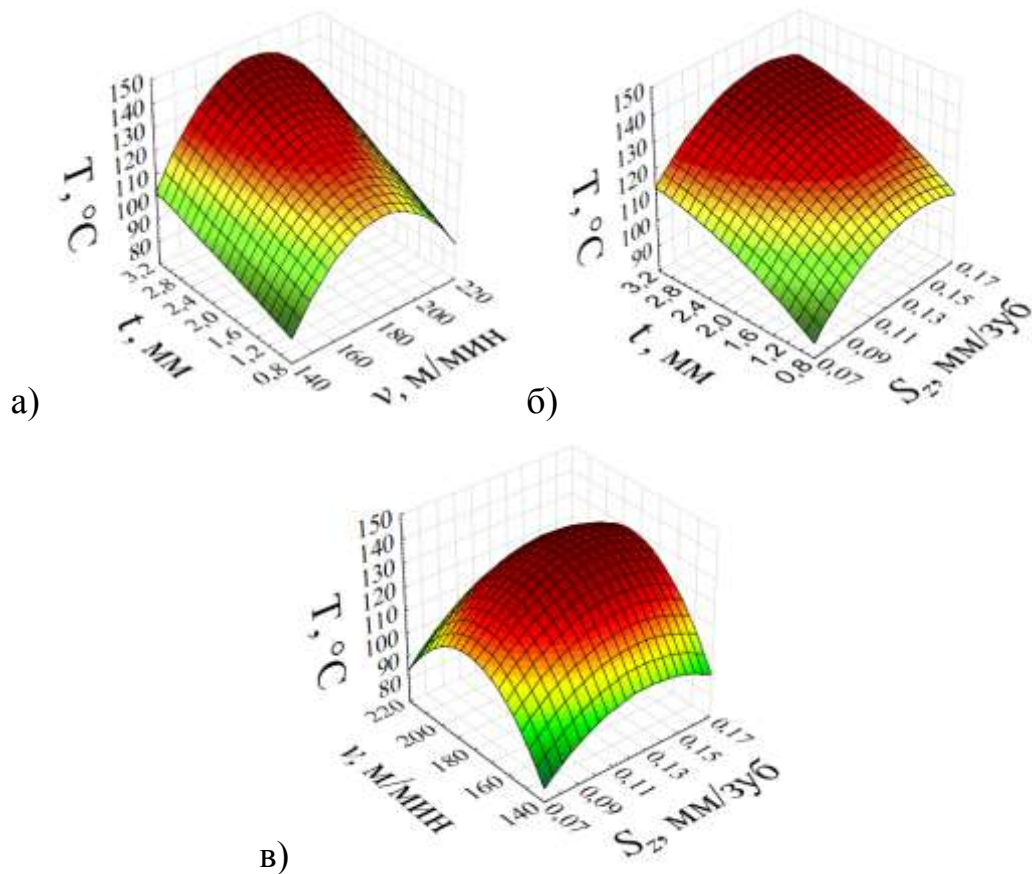


Рисунок 4.8 – Зависимости отклонения параметров температуры $T^{\circ}\text{C}$:
 а) – от скорости резания v и глубины резания t ; б) – от подачи на зуб S_z и глубины резания t ; в) – от подачи инструмента S_z и скорости резания v

В приложении Б в таблице Б.1 приведены термографические карты зоны резания, где увеличение яркости соответствует росту температуры.

По результатам анализа полученных данных можно сделать ряд выводов:

1. Температурные поля поверхности обрабатываемой детали и инструмента имеют одинаковый характер и линейную зависимость;
2. При увеличении продолжительности действия теплового источника температура инструмента приближается к максимальному значению;
3. Большая часть тепла, выделяемого при резании, рассеивается в срезаемые слои металла и не оказывает существенного влияния на формирование поверхностного слоя детали;
4. В условиях прерывистого резания температура тел (инструмента, заготовки) возрастает обратно пропорционально отношению времени рабочего и холостого ходов.

В процессе механической обработки стали, под действием сил резания, происходят деформация и разрушение кристаллической решетки, которые сопровождаются выделением большого количества тепла [113], в результате высоких температур на поверхности инструмента происходят структурные изменения. Полученные результаты позволяют прогнозировать температуру в зоне резания в зависимости от технологических режимов резания, что, в свою очередь позволит управлять стойкостью инструмента и снизить риски структурных изменений в материале.

4.3 Исследование влияния режимов резания на формирование отклонения формы цилиндрической поверхности

Основная цель эксперимента заключалась в определении влияния технологических параметров на точность формы («огранку»), при использовании монолитной твердосплавной фрезы в качестве режущего инструмента для операции ортогонального фрезоточения.

В работе представлены результаты анализа зависимости отклонения формы поверхности («огранку») $e_{c\ max}$ с применением математической модели адаптированной в разделе 2.3.3. Для измерения «огранки» использовался оптический профилометр выбранный в разделе 3.5.3. Обработка производилась монолитной радиусной фрезы ФКЦ 4321 (см раздел 3.3.1), по режимам резания указанным в разделе 3.4.1. Во время обработки применялась смазочно-охлаждающая жидкость Blasocut 2000 universal.

Эксперимент включал несколько этапов: кодирование факторов, планирование эксперимента, его проведение и проверку адекватности модели.

В качестве факторов, влияющих на формирование «огранки» поверхности определены следующие режимы резания:

1. S_z – подача на зуб, мм/зуб;
2. B_{oc} – осевая ширина фрезерования, мм;
3. t – глубина резания, мм;
4. v – скорость резания, м/мин.

Планирование эксперимента производилось по плану Тагучи. Таблица 4.7 содержит информацию об верхних $(S_{z_{max}}, B_{oc_{max}}, t_{max}, v_{max})$, основных $(S_{z_0}, B_{oc_0}, t_0, v_0)$ и нижних $(S_{z_{min}}, B_{oc_{min}}, t_{min}, v_{min})$ уровнях факторов эксперимента.

В данном случае, интервалы варьирования подачи, глубины и ширины выбраны исходя из рекомендуемых режимов резания, заложенных производителем инструмента, а также конструктивными особенностями инструмента.

Таблица 4.7 – Значение уровней факторов эксперимента по определению влияния технологических параметров на «огранку», при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

Фактор	Единицы измерения	Интервал варьирования	Уровни факторов		
			Нижний (-1)	Основной (0)	Верхний (+1)
S_z	мм/зуб	0,01	0,08	0,09	0,1
B_{oc}	мм	0,5	1	1.5	2
t	мм	2	2	4	6
v	м/мин	20	140	160	180

Метод предусматривает проведение 9 опытов. Матрица плана представлена в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Матрица планирования эксперимента по определению влияния технологических параметров на «огранку», при использовании фрезы со сменными многогранными пластинами в ортогональном фрезоточении

№ опыта	S_z , мм/зуб	B_{oc} , мм	t , мм	v , м/мин
1	0,08	1	2	140
2	0,08	1	4	160
3	0,08	1	6	180
4	0,09	1,5	2	160
5	0,09	1,5	4	180

Продолжение таблицы 4.8

6	0,09	1,5	6	140
7	0,1	2	2	180
8	0,1	2	4	140
9	0,1	2	6	160

После проведения эксперимента выявлено, что операция ортогонального фрезоточения не дает идеальной круглости наружной цилиндрической поверхности. В результате одновременного вращения инструмента и заготовки в процессе обработки сечение обрабатываемой заготовки принимает форму винтовой поверхности, как показано в разделе 2.1 (см рисунок 2.1).

Для анализа воспроизводимости формулы расчета максимальной высоты пика «огранки» (2.25, 2.26) сопоставили измеренную высоту профиля «огранки» $e_{c\ max1}$ с прогнозируемой, рассчитанной $e_{c\ max2}$ по формуле (2.26). В таблице 4.9 приведены прогнозируемые данные и результаты экспериментальных исследований, полученные методом оптических измерений.

Таблица 4.9 – Измеренные и прогнозируемые величины пиков «огранки»

№ опыта	$e_{c\ max1}$, мм	$e_{c\ max2}$, мм
1	0,0020	0,0031
2	0,0019	0,0030
3	0,0015	0,0027
4	0,0009	0,0034
5	0,0010	0,0045
6	0,0016	0,0044
7	0,0008	0,0049
8	0,0008	0,0043
9	0,0003	0,0060

Проведенные расчеты позволили построить график (рисунок 4.9), отображающий зависимость высоты пика «огранки» $e_{c\ max}$ от ряда факторов, и установить степень влияния каждого из них.

По полученным расчетным данным (2.25) был построен график (рисунок 4.9), отражающий влияние ряда факторов на высоту пика «огранки» $e_{c\ max}$, и позволяющий определить степень влияния каждого из них.

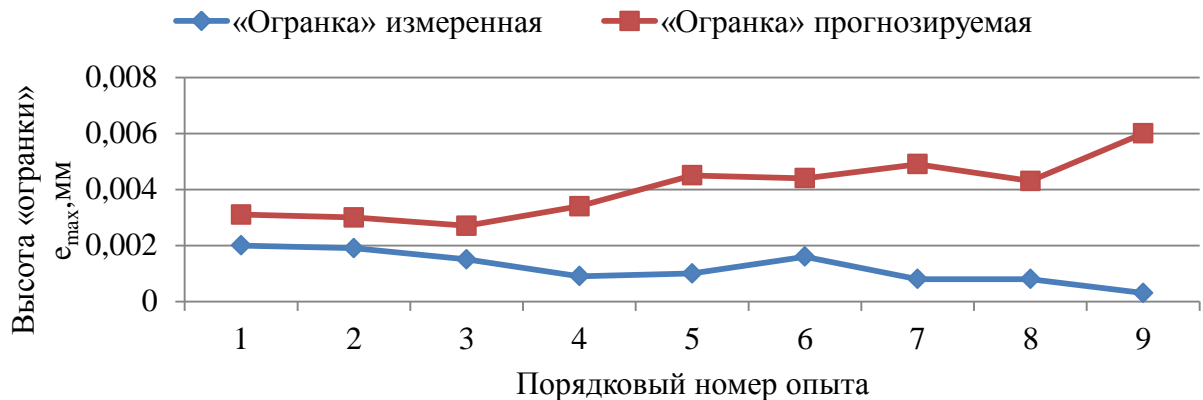


Рисунок 4.9 – График сходимости «огранки» поверхности

Наблюдается частичная сходимость предсказанных значений с экспериментальными данными. Начиная с 4 и по 9 опыт наблюдаются видимые расхождения в пределах от 0,001 до 0,005 мм. Данные расхождения возникают в результате того, что в расчетной формуле не отражено влияние геометрии режущего инструмента и физико-механических свойств обрабатываемого материала на процесс формирования максимальной высоты пика «огранки».

Анализ результатов исследования показал, что при увеличении подачи (рисунок 4.10а, б, в), высота пика «огранки» увеличивается линейно. Однако существуют зоны, где влияние глубины резания $t = 1,6..2,0$ мм на высоту пика «огранки» не является значительным (рисунок 4.10а). Наименьшая величина «огранки» наблюдается при глубине резания t в диапазоне 3,5..5,5 мм (рисунок 4.10б, е), при высоких значениях подачи на зуб S_z и низкой скорости резания v . Однако при средних значениях величин t , V_{oc} , v (рис. 4.10г, д, е) наблюдаются зоны образования наибольшей высоты «огранки», вероятно связанной с образованием наклепа на режущую кромку инструмента.

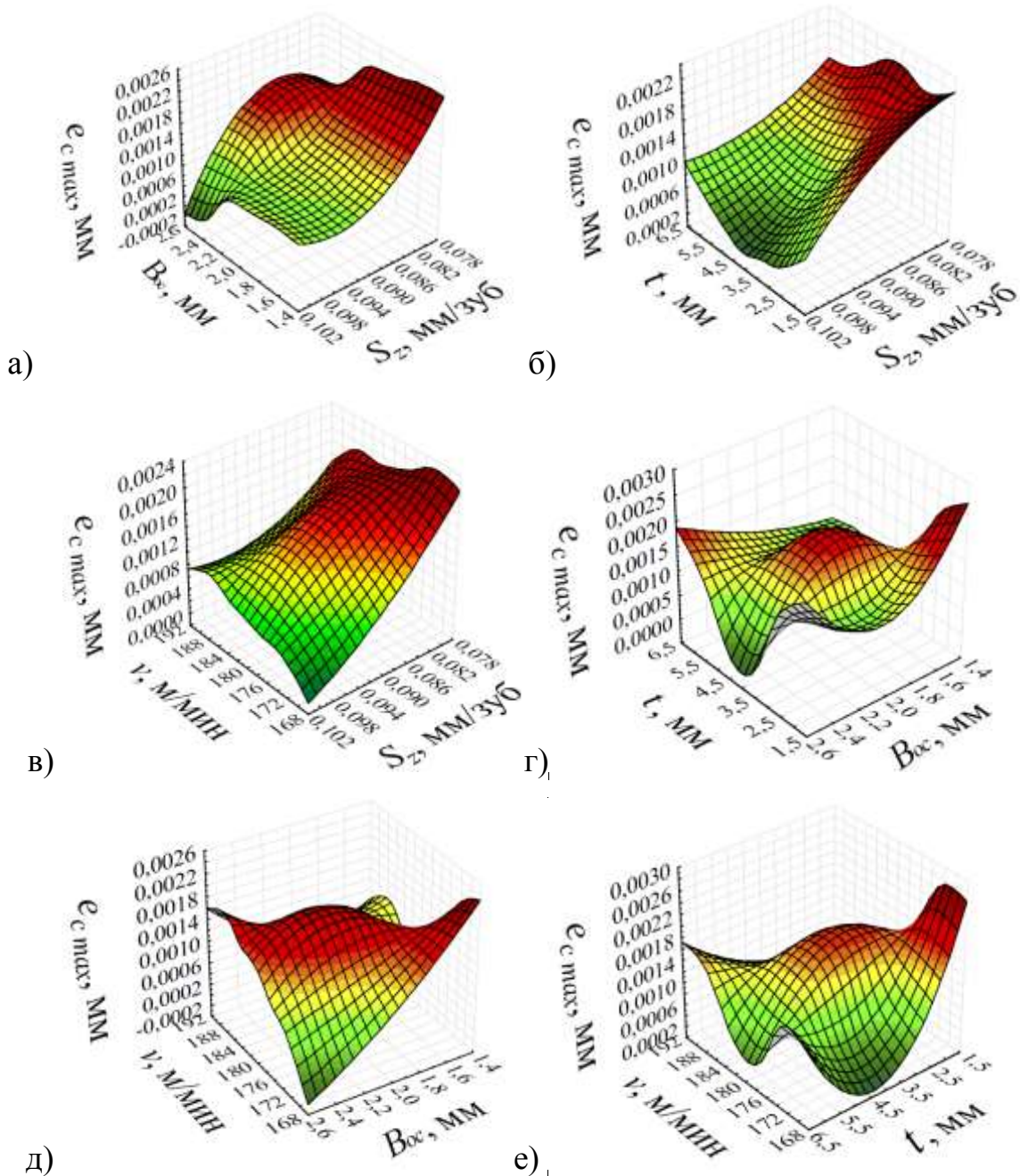


Рисунок 4.10 – Зависимости отклонения параметров высоты пика «огранки» $e_{c\ max}$: а) – от осевой ширины фрезерования B_{oc} и подачи на зуб S_z ; б) – от глубины резания t и подачи на зуб S_z ; в) – от скорости резания v и подачи на зуб S_z ; г) – от глубины резания t и осевой ширины фрезерования B_{oc} ; д) – от скорости резания v и осевой ширины фрезерования B_{oc} ; е) – от скорости резания v и глубины резания t

В результате проведенного исследования «огранки» было определено, что наибольшее влияние на «огранку» оказывает глубина резания t при значениях t больших, чем 2,5 мм. Также стоит учитывать, что при увеличении t свыше

половины диаметра инструмента может возникнуть вибрация, что приведет к повышенному износу режущей кромки.

После выполнения оптических измерений профилометром (см. раздел 3.5.3) были получены топографии поверхности (рисунок 4.11), по которым построены графики микронеровностей поверхности, позволяющие обнаружить и измерить «огранку», возникающую в процессе обработки фрезоточением (рисунок 4.12).

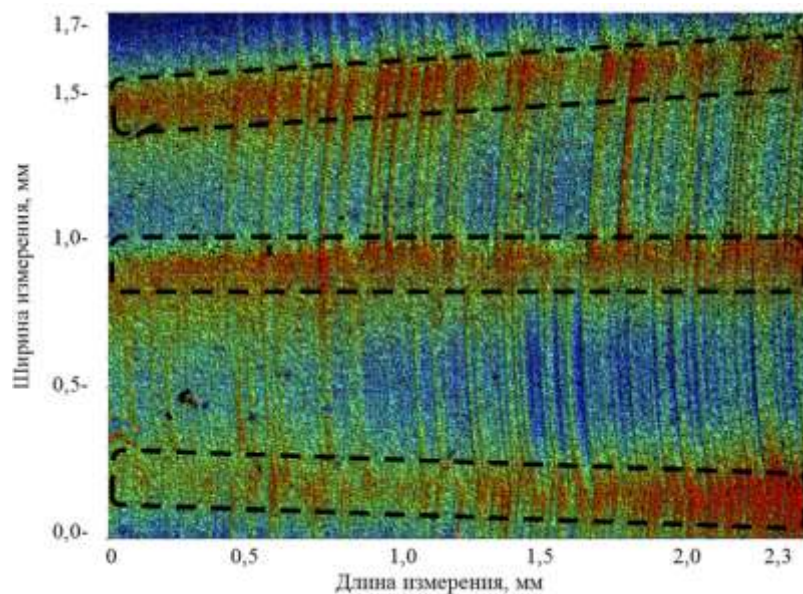


Рисунок 4.11 – Топография поверхности обработанной заготовки (опыт №8)

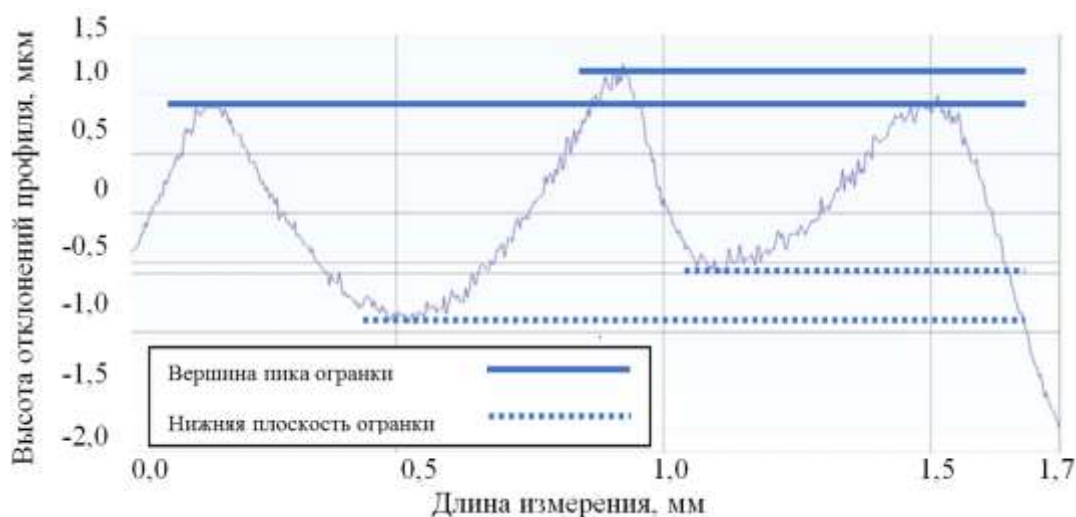


Рисунок 4.12 – График микрогеометрии обработанной заготовки (опыт №8)

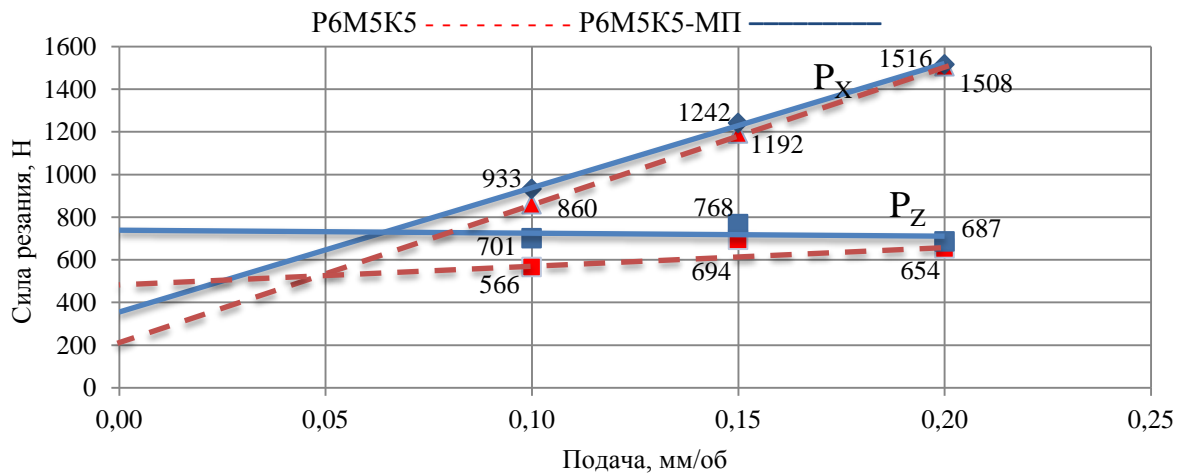
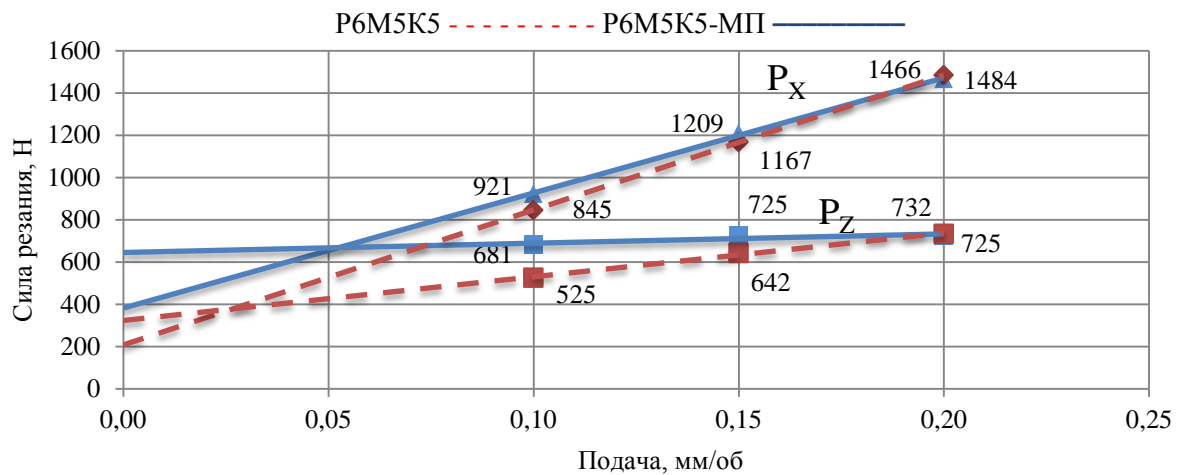
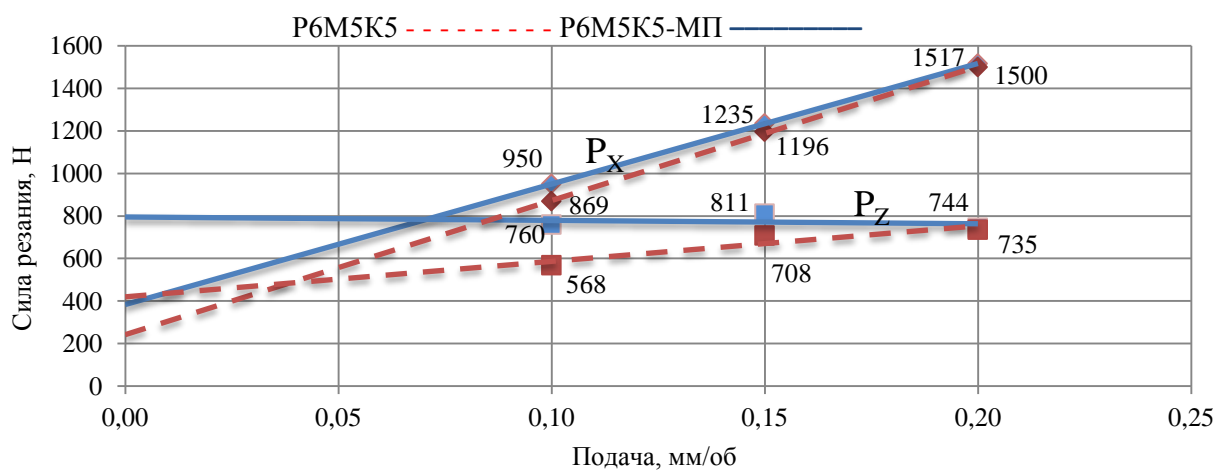
В приложении В приведены результаты измерений «огранки» цилиндрической поверхности в таблице В.1.

4.4 Исследование влияния силы резания на обрабатываемость быстрорежущих сталей

Цель проведения эксперимента заключается в определении влияния структуры быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП на их обрабатываемость резанием.

В работе представлены результаты анализа влияния структуры быстрорежущих сталей P6M5K5 и P6M5K5-МП на их обрабатываемость резанием от постоянной величины радиальной глубины резания t скорости резания v , и подачи S и переменных величин заднего угла резца α . Для проведения эксперимента использовалась математическая модель, адаптированная в разделе 2.3.4. Для измерения сил использовался динамометр выбранный в разделе 3.5.4. В ходе эксперимента задний угол резца (см. раздел 3.3.2) α изменялся в пределах $2..10^\circ$ с шагом 2° . Передний угол γ был постоянным и составлял 2° . Режимы резания назначались в разделе 3.4.3. Измерения производились с помощью динамометра Kistler Type 9129AA (см. раздел 3.5.4). Во время обработки использовалась смазочно-охлаждающая жидкость Blasocut 2000 universal.

На рисунках 4.13-4.17 точками приведены результаты экспериментального определения сил резания, отображающие зависимость сил резания от величины подачи в тангенциальном и осевом направлении полученной при переменных задних углах резца. Их зависимости представлены в виде линий тренда (P6M5K5, -штриховая линия, P6M5K5-МП - сплошная линия), рассчитанные по методу наименьших квадратов, с целью определения коэффициентов сил резания, согласно уравнений 2.31 и 2.32 представленных в разделе 2.3.4.

Рисунок 4.13 – Зависимости сил резания от подачи при заднем угле $\alpha = 2^\circ$ Рисунок 4.14 – Зависимости сил резания от подачи при заднем угле $\alpha = 4^\circ$ Рисунок 4.15 – Зависимости сил резания от подачи при заднем угле $\alpha = 6^\circ$

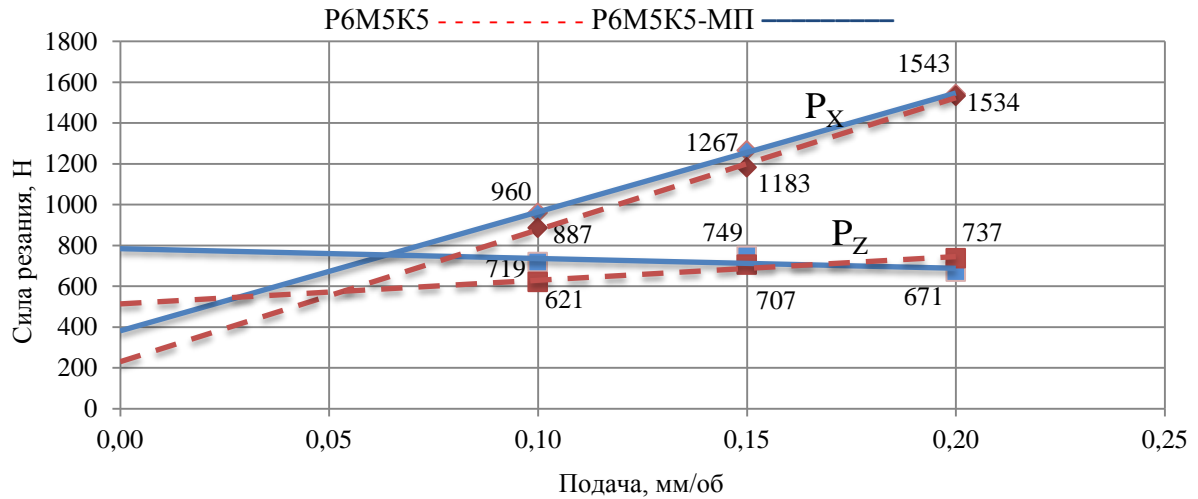


Рисунок 4.16 – Зависимости сил резания от подачи при заднем угле $\alpha = 8^\circ$

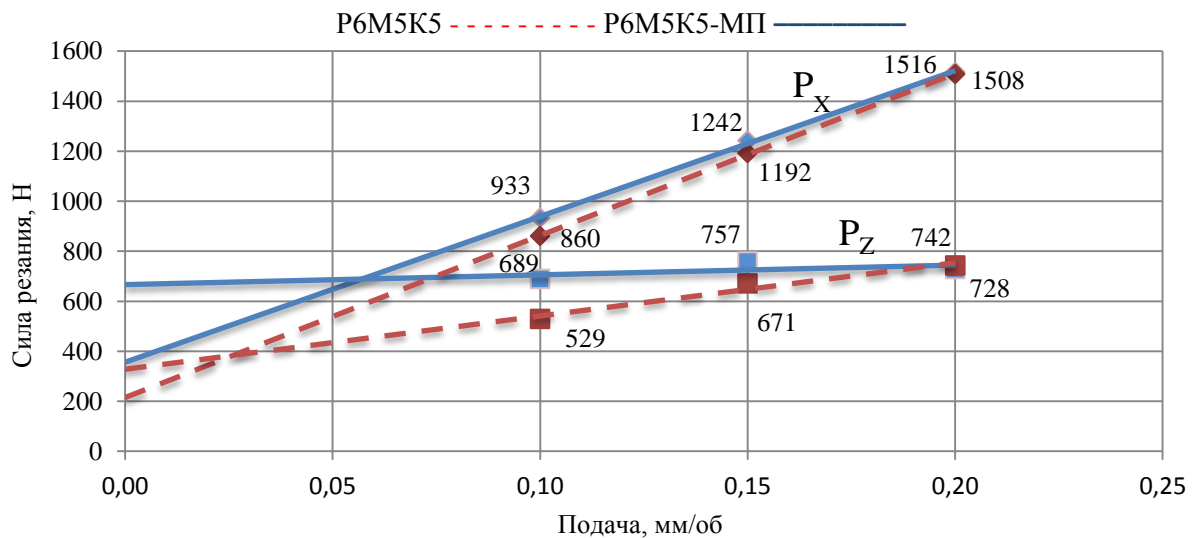


Рисунок 4.17 – Зависимости сил резания от подачи при заднем угле $\alpha = 10^\circ$

Результаты анализа графиков и полученных коэффициентов сил резания свидетельствует о том, что при обработке стали P6M5K5, полученной методом литья наблюдаются меньшие силы резания (штриховая линия), по сравнению с обработкой стали P6M5K5-МП, полученной порошковым методом (сплошная линия). Это относится как к осевому, так и тангенциальному направлению сил резания. При увеличении подачи уменьшается разница между силами резания, а при подаче равной 0,2 мм/об разницы между силами практически нет. При подаче равной 0,1 мм/об зафиксирована максимальная разница. Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что полученную литьем сталь можно более

эффективно обрабатывать резанием, поэтому при ее обработке можно использовать более высокие режимы резания, чем при обработке порошковой быстрорежущей стали Р6М5К5-МП. Стоит отметить, что у данных сталей схожий химический состав, разница в содержании некоторых легирующих элементов минимальная составляет не более 5%.

Исследователями ранее не производилось широкого изучения механических свойств быстрорежущего сплава Р6М5К5-МП, в связи с этим сложно судить об отличиях от Р6М5К5 полученной методом литья. Следовательно, можно сделать вывод, что различная структура является главным фактором, влияющим на обрабатываемость Р6М5К5 и Р6М5К5-МП.

Обзор литературы показал отсутствие данных о механических свойствах для быстрорежущей стали, получаемой порошковым методом. Необходимы дополнительные комплексные исследования для объяснения различий обрабатываемости быстрорежущих сталей Р6М5К5 и Р6М5К5-МП, что в дальнейшем позволит установить, как на контактные процессы в зоне резания и на процесс формирования стружки влияет структура материала.

Как известно, при выполнении черновой обработки, интенсификация режимов резания ограничена характеристиками конкретной технологической системы. Однако, при выполнении чистовой обработки дополнительно необходимо учитывать качество обработанной поверхности, что может потребовать проведения дополнительных исследований.

В процессе эксперимента было установлено, что изменение заднего угла резца α с шагом 2° в диапазоне от 2° до 10° оказывает незначительное влияние на осевую силу резания P_x . Влияние на радиальную силу P_z заднего угла резца во время обработки сплава Р6М5К5 при значениях $\alpha = 4^\circ$ и $\alpha = 10^\circ$, с увеличением подачи выражается в увеличении радиальной силы, в отличие от $\alpha = 2^\circ$, $\alpha = 6^\circ$, $\alpha = 8^\circ$, когда с увеличением подачи радиальная сила снижается. Передний угол γ был постоянным и составлял 2° . Один из возможных факторов, объясняющих данное явление, заключается в неоптимальной геометрии режущей части инструмента, использованного в эксперименте. Однако, эти данные могут быть

использованы для повышения точности расчета зон стабильного резания в процессе разработки технологических процессов механической обработки изделий из быстрорежущей стали в условиях инструментального производства. Обычно, чтобы снизить вибрации при резании, уменьшают задний угол режущего инструмента, это приводит к увеличению силы резания, которая в данном случае становится ограничивающим фактором. Снижение сил резания можно рассматривать как потенциал для компенсации возрастающего из-за увеличения скорости износа инструмента. Если увеличение силы резания не зависит от величины заднего угла, то это дает дополнительные возможности для обеспечения стабильности процесса резания и, следовательно, повышения качества обработанной поверхности, стойкости инструмента и ресурса обрабатывающего оборудования.

4.5 Внедрение полученных результатов исследований, с представлением практического эффекта

В целях повышения эффективности обработки осевого режущего инструмента, переходы ортогонального фрезоточения возможно комбинировать с фасонным пятиосевым фрезерованием для обработки винтовых стружечных канавок на цилиндрических поверхностях (см. рисунок 1.21б). Применяя его к деталям, имеющим сложный профиль, можно существенно повысить производительность процесса механической обработки, сократить сроки выпуска продукции и снизить себестоимость изделия за счет уменьшения или полного отказа от оснастки, обеспечить концентрацию операций и инструмента на одном рабочем месте.

Ранее обработка канавок производилась на универсальном горизонтально-фрезерном станке, с использованием дисковой угловой и концевой фрезы, а также с применением массивных приспособлений (рисунок 4.18). Фрезерование винтовой канавки на цилиндрической поверхности требует согласования вращательного движения заготовки с продольным перемещением стола.

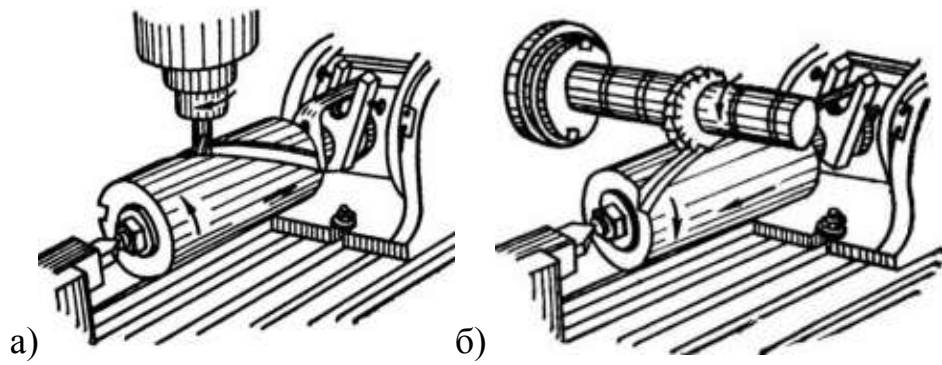


Рисунок 4.18 – Классическая схема фрезерования стружечных канавок:

а) – предварительная прорезка концевой фрезой;

б) – формирование угла наклона стружечной канавки дисковой угловой фрезой

Также возможно выполнение фрезерования стружечных канавок на координатно-фрезерном станке 6904ВМФ2. На рисунке 4.19 приведен пример технологической наладки [89].

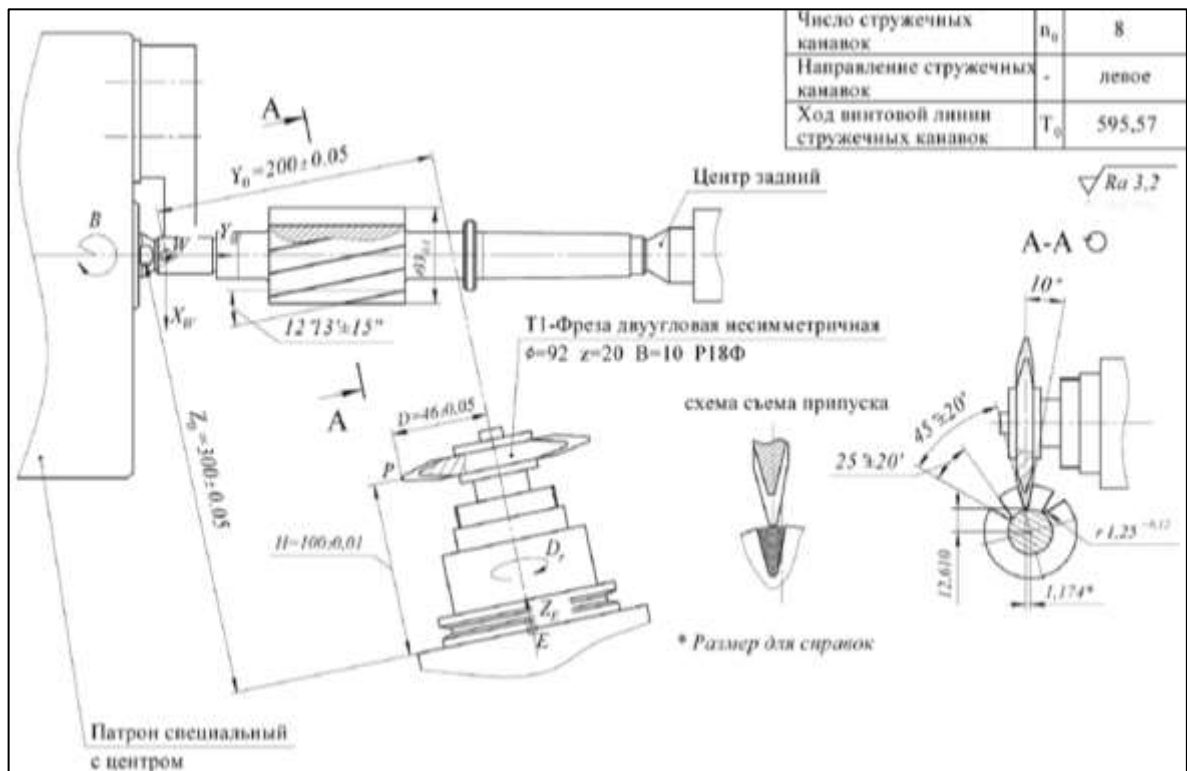


Рисунок 4.19 – Технологическая наладка при фрезеровании стружечной канавки

[89]

Технология пятиосевого фрезерования стружечных канавок на многозадачном станке апробирована в инструментальном производстве

Иркутского авиационного завода (филиал ПАО «Яковлев»), получен положительный результат (рисунок 4.20).



Рисунок 4.20 – Стружечные канавки, полученные фасонным пятиосевым фрезерованием на многозадачном обрабатывающем центре с ЧПУ

Разработаны технологические рекомендации применения метода фрезоточения для изготовления осевых инструментов из быстрорежущей стали, включая методику подготовки управляющей программы для оборудования с ЧПУ. Оформленный акт представлен в приложении Д.

4.6 Эффективность использования фрезоточения в сравнении с классическим точением

Подавляющее большинство наружных поверхностей тел вращения обрабатываются однолезвийным режущим инструментом – призматическими вершинными резцами. Вследствие того, что обработка заготовки ведется вершиной резца, этот метод имеет ряд ограничений по скорости резания, производительности и формообразованию поверхности. Однако основным недостатком токарной обработки является дробление стружки, которое вызывает дополнительные трудности по обслуживанию станков, в частности при обработке заготовок из материалов, образующих длинную стружку. При точении такая стружка, наматываясь на резец и заготовку, ухудшает качество обработки и портит детали станка.

С целью кратного повышения производительности при изготовлении осевого режущего инструмента, однолезвийную обработку можно заменить на фрезоточение. Использование указанного метода позволяет сократить основное

время, затрачиваемое на обработку детали (сокращение количества проходов в сравнении с токарной обработкой в связи с увеличенной толщиной снимаемого припуска за 1 проход), за счет высоких скоростей резания.

Оптимальность режимов резания можно оценивать по одному или нескольким критериям [71]. В число технико-экономических показателей могут входить:

- производительность процесса;
- себестоимость обработки;
- расход инструмента на заданную программу выпуска;
- количество обрабатываемых заготовок.

Технологическими ограничениями служат:

- точность и шероховатость обработанной поверхности;
- равномерность фрезерования;
- технические возможности технологического оборудования;
- режущие свойства инструмента.

В качестве критерия оптимизации в работе принята производительность процесса. Технологическими ограничениями приняты технические возможности технологического оборудования, достигаемая точность и шероховатость обработанной поверхности.

Численный эксперимент в 3 этапа:

- обработка образца по базовому технологическому процессу, используя классическую токарную обработку;
- обработка образца ортогональным фрезоточением;
- сравнение машинного времени обработки.

Для чистоты результатов эксперимента станок, размеры и материал образца были одинаковы.

В качестве обрабатываемого изделия будет рассмотрена концевая фреза, представленная ранее в первой главе (см. рисунок 1.17), с габаритными размерами $\varnothing 40 \times 300$ мм.

Для классического точения, в базовом технологическом процессе используется резцовая головка С6-DDNNN-00065-15 (рисунок 4.21) с режущей пластиной CNMG 15 06 04-PM 4215, рекомендуемой производителем для обработки быстрорежущих сталей.



Рисунок 4.21 – Резцовая головка С6-DDNNN-00065-15 [58]

В качестве режущего инструмента для ортогонального фрезоточения применяем выбранную согласно методики раздела 3.3 и применяемую в разделе 4.1.2 фрезу YG-1 GMG19910.

Данные числового эксперимента занесены в таблицу 4.10.

Таблица 4.10 – Данные числового эксперимента по сравнению ортогонального фрезоточения с классическим точением

Сравниваемые параметры	Единица измерения	Величина	
		Вариант 1 (точение)	Вариант 2 (ортогональное фрезоточение)
Обрабатываемый материал	–	P6M5K5-МП	
Диаметр заготовки, $d_{\text{заг}}$	мм	45	45
Диаметр изделия, $d_{\text{изд}}$	мм	40,5	40,5
Обрабатываемая длина, l	мм	190	190
Подача на зуб, S_z	мм/зуб		0,12
Подача на оборот, $S_{\text{пр}}$	мм/об	0,12	
Глубина резания, t / осевая ширина фрезерования, $B_{\text{ос}}$	мм	1,5	1,5
Скорость резания, v	м/мин	150	150

Продолжение таблицы 4.10

Частота вращения заготовки, $n_{\text{заг}}$	об/мин	3600	3
Частота вращения инструмента, $n_{\text{и}}$	об/мин	–	3600
Количество проходов, i	шт	3	3
Суммарное линейное перемещение инструмента, Y_1	мм	113920	56960

Полученные значения машинного времени $T_{\text{маш}}$ занесены в таблицу 4.11.

Таблица 4.11 – Машинное время точения и ортогонального фрезоточения

Вариант обработки	$T_{\text{маш}}$, мин
Точение	1,66
Ортогональное фрезоточение	1,41

Сравним полученные результаты машинного времени используя формулу (4.30):

$$\frac{T_{\text{маш т}} - T_{\text{маш фт}}}{T_{\text{маш фт}}} \cdot 100\%. \quad (4.30)$$

где $T_{\text{маш т}}$ – машинное время токарной обработки,

$T_{\text{маш фт}}$ – машинное время фрезоточения.

Следовательно используя значения из таблицы 4.11 получаем:

$$\frac{1,66 - 1,41}{1,41} \cdot 100\% = 17,3\%.$$

При сопоставлении вариантов процесса предварительной обработки осевого режущего инструмента методом фрезоточения можно сделать вывод, что в этом случае производительность повышается на 17,3%.

Использование ортогонального фрезоточения позволяет сократить количество операционных переходов (продольного точения, подрезания торца,

точение канавок) и, в сочетании с увеличением режимов резания (в сравнении с базовым вариантом).

4.7 Технологические рекомендации по применению операции ортогонального фрезоточения в инструментальном производстве

Технологические рекомендации разработаны для проектирования технологических процессов изготовления осевого режущего инструмента методом ортогонального фрезоточения, с целью обеспечения заданной точности формы и обеспечения заданного качества поверхности в инструментальном производстве. Технологические рекомендации содержат необходимые исходные данные по выбору геометрических параметров режущего инструмента, формулы и рассчитанные по ним значения режимов резания, а также другие технологические параметры механической обработки для выполнения операции ортогонального фрезоточения заготовки из быстрорежущей стали с помощью концевой твердосплавной фрезы.

Область распространения: инструментальные участки и инструментальное производство, располагающее мощностями для изготовления осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали.

Технологические рекомендации предназначены для использования инженерами-технологами инструментального производства при разработке директивных, типовых и рабочих технологических процессов обработки.

Технологические рекомендации разработаны на основании экспериментальных исследований, проведенных в научно-исследовательской лаборатории технологии высокопроизводительной механической обработки ИрНИТУ и результатов совместной работы с применением производственного опыта Иркутского авиационного завода (филиал ПАО «Яковлев»).

4.7.1 Рекомендации по выбору оборудования

Процесс ортогонального фрезоточения рекомендуется производить на многозадачных станках с ЧПУ с координатами X, Z, B, наличие координаты Y

рекомендуется (рисунок 4.22), DMG CTX beta 800 и DMG CTX beta 1250 (см рисунок 1.19) подходят для этих целей. Стоит отметить что, на станках, не обладающих достаточным запасом хода по оси Y, обработка не может проводиться.

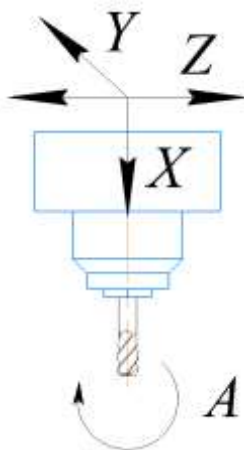


Рисунок 4.22 – Координаты фрезерной головки многозадачного станка с ЧПУ

Фрезоточение можно выполнять и на токарном обрабатывающем центре с приводным инструментом (см. рисунок 3.1) с угловым расположением закрепляемого инструмента, при этом угол установки инструмента равен 90° . Многозадачный станок с ЧПУ обеспечивает надежное закрепление приводного блока инструмента и высокую частоту вращения инструмента (см. таблицу 3.2).

4.7.2 Рекомендуемые к обработке материалы

В качестве обрабатываемого материала используются стали Böhler S390, P6M5K5 и P6M5K5-МП. Химический состав быстрорежущих сталей P6МП5K5 и P6M5K5-МП указан в таблице 1.3. Свойства сплава в полуфабрикатах и деталях должны отвечать требованиям EN ISO 4957, ГОСТ 19265-73, ГОСТ 28393 - 89.

4.7.3 Рекомендуемые марки материала и параметры инструмента

Для черновой, получистовой и чистовой обработки быстрорежущей стали ортогональным фрезоточением рекомендуется применять два основных типа конструкций режущего инструмента: монолитные и фрезы со сменными многогранными пластинами. Рекомендуется в первую очередь применение монолитных концевых фрез из твердого сплава марки H10F и группы

обрабатываемости М30 по ГОСТ 3882-74, обладающих преимуществом в достижении низкой шероховатости поверхности. Рекомендуются также фрезы со сменными многогранными пластинами, которые обеспечивают снижение вспомогательного времени.

4.7.4 Рекомендации по назначению режимов резания для операции ортогонального фрезоточения

Обработку деталей из сталей Böhler S390, P6M5K5, P6M5K5-МП на многооперационном станке производить с обеспечением повышенной жесткости технологической системы. Инструмент должен быть установлен с минимальным вылетом. Операцию ортогонального фрезоточения целесообразно выполнять после отжига заготовки.

Рекомендуемые диапазоны рациональных режимов резания процесса черновой, получистовой обработки с большим съемом металла методом ортогонального фрезоточения приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Рекомендуемые режимы резания для ортогонального фрезоточения

Материал		Конструкция инструмента	Режимы резания			
Обрабатываемый	Режущий		Скорость резания м/мин	Подача на зуб, мм/зуб	Осевая ширина резания, мм	Глубина резания, мм
P6M5K5	H10F	Монолитный	170	0,09	1,5	2
P6M5K5-МП			140	0,1	1,5	2
Böhler S390			150	0,12	1,5	1
		Сборный	100	0,08	1,5	1

Для эффективного выполнения ортогонального фрезоточения необходимо обеспечить равномерное распределение смазочно-охлаждающей жидкости по всей зоне обработки.

4.7.5 Рекомендации по метрологическому обеспечению операционного контроля качества поверхности осевого режущего инструмента

Технология и объем контрольных операций в технической документации разрабатываются заводом-изготовителем.

Контроль качества выполнения ортогонального фрезоточения производится по следующим параметрам:

- шероховатость поверхности;
- точность формы;
- соблюдение технологических режимов обработки;

Шероховатость обрабатываемых поверхностей осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали сплавов P6M5K5, P6M5K5-МП и Böhler S390, в зависимости от подачи и геометрии режущей части инструмента может быть получена в пределах Ra 1,09..1,74 мкм по ГОСТ 2789-73.

Шероховатость обработанной поверхности Ra 1,09 мкм достигается с использованием монолитной твердосплавной фрезы (см раздел 4.1.1) при следующих режимах резания:

- скорость резания $v = 150 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$;
- при подаче $S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$;
- осевой ширине фрезерования $B_{oc} = 1,5$ мм;
- глубине резания $t = 1$ мм.

Ra 1,74 мкм достигается с использованием сборной фрезы со сменными многогранными пластинами (см раздел 4.1.2) при следующих режимах резания:

- скорость резания $v = 100 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$;
- при подаче $S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$;
- осевой ширине фрезерования $B_{oc} = 1,5$ мм;
- глубине резания $t = 1$ мм.

Операционный контроль заключается во внешнем осмотре с целью обнаружения механических дефектов, которые могут возникнуть или проявиться в процессе ортогонального фрезоточения.

В качестве средства измерения шероховатости поверхности рекомендуется использовать контактный профилометр типа Taylor Hobson Form Talysurf i200, либо отечественные профилометры со схожими точностными характеристиками.

Контроль отклонений формы осевого режущего инструмента производить оптическим профилометром типа Bruker Contour GT-K1. Допуски на отклонения от круглости при использовании ортогонального фрезоточения определять по ГОСТ 24643-81.

4.7.6 Рекомендуемый технологический маршрут выполнения операции фрезоточения

Технологический маршрут выполнения операции фрезоточения отличается от выполнения операции фрезерования на многозадачном станке с ЧПУ, тем, что вращается не только режущий инструмент, но и заготовка.

Операции формообразования для различных форм конструктивных элементов инструмента представлены в таблице 4.13. Завершение процесса фрезоточения происходит после того, как обрабатываемая деталь повернется на угол 365° , что необходимо для того, чтобы снять окончательно припуск и сформировать торец.

Таблица 4.13 – Описание операций формообразования для каждой формы конструктивного элемента изделия

Форма конструктивного элемента инструмента	Описание процесса
Цилиндрическая	Обработка наружной цилиндрической поверхности, шпиндель с заготовкой вращается.
Квадратная	Обработка каждой грани квадрата с поворотом заготовки.

Продолжение таблицы 4.13

Треугольная	Обработка каждой грани треугольника с поворотом заготовки.
Коническая	Обработка конической поверхности со снятием припуска под углом относительно оси детали, шпиндель с заготовкой вращается.

Комбинированная обработка включает в себя указанные выше конструктивные элементы.

Обработку резьбы на осевом режущем инструменте рекомендуется выполнять специализированными фрезами, конструкции Лашнева С.И., Куликова М.Ю., Ямникова А.С. (см. рисунок 1.3).

В таблице 4.14 приведен код управляющей программы процесса ортогонального фрезоточения цилиндрической поверхности.

Таблица 4.14 – Код управляющей программы ортогонального фрезоточения цилиндрической поверхности

№	Строчка кода
1	N5 F_HEAD(82837503,49.,0.,17.,- 360.,10.,5.,13.75,2.,250.,600.,2.,4000.,0.,71,1,799,0,- 310.,41.,7,0,6,20.,50.,50.,1);*RO*
2	N10 F_CON("1",0,"E_LAB_A_1","E_LAB_E_1");*RO*
3	N15 F_MI_CON("MILL_D16","",1,0.09,2,180.,2,100000,33,44.501,90,44.5,90 ,2.5,0.,0.,0,10.,41,0,0.,0.1,0,0.,0.,-35.,1.,2.,91);*RO* F_END(0,1,5);*RO*
4	M30 ;#SM;*RO*
5	E_LAB_A_1: ;#SM Z:67
6	;#7__DlgK contour definition begin - Don't change!;*GP*;*RO*;*HD*
7	G19 G90 DIAMOF;*GP*
8	G0 Y0 Z-35 ;*GP*
9	G1 Y2516.416 Z-53 ;*GP*
10	RET ;*GP*

Продолжение таблицы 4.14

11	;CON,1,0.0000,1,1,MST:0,0,AX:Y,Z,J,K,CYL:1,1,89.002;*GP*;*RO*;*HD*
12	;S,EX:0,EY:-35;*GP*;*RO*;*HD*
13	;LA,EX:2516.416,EY:-53;*GP*;*RO*;*HD*
14	##End contour definition end - Don't change!*GP*;*RO*;*HD*

4.7.7 Преимущества процесса ортогонального фрезоточения

Преимущественные отличия ортогонального фрезоточения в систематизированном виде приведены в таблице 4.15.

Таблица 4.15 – Показатели ортогонального фрезоточения

№ п/п	Наименование	Примечание
1	Область применения	Механическая обработка наружных поверхностей тел вращения, в том числе длинномерных валов и валов малого и большого диаметра.
2	Размеры обрабатываемой детали	Ограничивается только возможностями станка и неуравновешенностью заготовки.
3	Группа материалов	Быстрорежущие сплавы, полученные литьем и металлпорошковым способом.
4	Точность размеров	Максимальное значение величины пика «огранки» составляет 0,002 мм, что соответствует 3 степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения по ГОСТ 24643-81.
5	Шероховатость по <i>Ra</i> , мкм:	<i>Ra</i> 1,09..3,1 мкм по ГОСТ 2789-79, что соответствует 6 – 7 качеству.
6	Производительность процесса, %	Повышение производительности процесса механической обработки, выполняемого до термообработки на 15% относительно классической

Продолжение таблицы 4.15

		токарной и фрезерной обработки.
7	Безопасность процесса	Снижение вероятности поломок инструмента и травматизма за счет исключения длинной сливной стружки.
8	Температура в зоне резания	Низкий уровень температуры в зоне резания зафиксирован в диапазоне подач $S_z = 0,13..0,17$ мм/зуб.

4.8 Выводы по четвертой главе

По результатам проведенного комплекса экспериментальных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Экспериментальные данные подтвердили адекватность математических моделей, предназначенных для оценки влияния параметров обработки и глубины резания на шероховатость поверхности. Это позволит использовать результаты моделирования для определения рациональных режимов резания, обеспечивающих требуемое качество поверхности при производстве осевого режущего инструмента из быстрорежущей стали в инструментальном производстве;

2. Исследования проводились в соответствии с трехфакторными и четырехфакторными планами, которые позволяют определить взаимодействие факторов при помощи меньшего количества экспериментов. Это дает возможность определить наилучшее сочетание технологических параметров для достижения заданных значений точности формы и шероховатости;

3. При использовании монолитной концевой фрезы с заданными режимами резания удалось достигнуть шероховатости поверхности не выше $Ra = 1,09$ мкм без ущерба для производительности процесса. Это качество поверхности можно считать удовлетворительным по сравнению с поверхностью, полученной с помощью фрезы со сменными многогранными пластинами;

4. Установлены закономерности изменения температуры в зоне резания в зависимости от режимов резания. По результатам проведенных экспериментов

можно сделать вывод о том, что наибольшее влияние на температуру оказывает глубина резания. При увеличении глубины резания происходит значительный рост температуры. Изменение подачи незначительно влияет на рост температуры. Тем не менее, при увеличении подачи происходит рост температуры, который замедляется при работе на подачах $S_z = 0,13..0,17$ мм/зуб. Установлено неоднозначное влияние скорости резания на температуру. Зафиксированы экстремальные значения температуры при скорости v резания 170 м/мин. Подтвержден прерывистый характер резания, при переходе режущей кромки. При смене режущей кромки происходит скачкообразное изменение температуры. Достигнутая в ходе экспериментов по фрезоточению максимальная температура резания значительно ниже температуры, достигаемой при обычном точении быстрорежущей стали, что позволяет интенсифицировать режимы резания;

5. Определено влияние составляющих подачи инструмента, таких как собственно минутная подача фрезы и подача, определяемая частотой вращения заготовки на формирование «огранки» поверхности. Показано, что оптический профилометр является эффективным средством измерения «огранки», позволяющим получить объективные результаты с минимальной трудоемкостью. Достигнутое в ходе проведения работ максимальное значение величины пика составляют до 0,002 мм, что является удовлетворительным результатом, так как соответствует 3 степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения по ГОСТ 24643-81;

6. Установлено, что быстрорежущая сталь, полученная литьем, имеет лучшую обрабатываемость резанием, чем сталь аналогичной марки, полученная методом порошковой металлургии. Это говорит о влиянии структуры материала на процесс лезвийной обработки и позволяет корректировать режимы резания в зависимости от структуры материала, обеспечивая максимально возможную производительность процесса резания для каждой марки быстрорежущей стали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения комплекса теоретических и экспериментальных исследований в рамках диссертационной работы проанализированы основные технологические параметры процесса ортогонального фрезоточения, влияющие на точность формы и качество поверхности. Научные выводы и практические результаты, вносят вклад в развитие отечественного инструментального производства:

1. Алгоритм математической модели учитывающий:

– взаимное расположение режущих кромок и обрабатываемой поверхности с учетом одновременного вращения инструмента и заготовки;

– упругие перемещения инструмента в момент вхождения зуба фрезы в обрабатываемый материал;

– переменную толщину срезаемого слоя, возникающую при вхождении последующего зуба и позволяет смоделировать регенеративные вибрации при резании;

Применение адаптированной математической модели процесса ортогонального фрезоточения позволяет прогнозировать микрогеометрию обработанной поверхности.

2. На основе математической модели разработана программа для выполнения численных расчетов в среде MatLab, позволяющая прогнозировать микрогеометрию поверхности при ортогональном фрезоточении быстрорежущих сталей при изменяющихся режимах резания и геометрических параметрах режущего инструмента. Программа зарегистрирована, получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2023669839 (приложение Г);

3. Установлено влияние параметров резания на шероховатость и «огранку» поверхности, а также на температуру в зоне резания при обработке быстрорежущей стали ортогональным фрезоточением. Полученные функциональные зависимости могут использоваться в качестве удобного инструментария для прогнозирования выходных параметров в процессе назначения режимов резания;

4. Определена зависимость «огранки» поверхности от подачи инструмента и подачи, формирующейся частотой вращения заготовки, что позволяет назначать режимы резания, минимизирующие высоту пика огранки;

5. Показано, что фрезы, оснащенные сменными пластинами, являются эффективным инструментом для операции фрезоточения при условии правильного выбора режущей геометрии и корректно установленного положения фрезы относительно заготовки, позволяющих уменьшить погрешность формы и достичь требуемой шероховатости поверхности;

6. Полученные в работе результаты позволяют определить технологические операции, используемые при механообработке осевых режущих инструментов из быстрорежущей стали, в которых фрезоточение может дать наибольший технико-экономический эффект;

7. Установлено, что использование ортогонального фрезоточения позволяет повысить производительность резания по сравнению с точением на 17,3%;

8. Разработаны технологические рекомендации по ортогональному фрезоточению быстрорежущей стали, позволяющие выполнять обработку достигая шероховатости поверхности не более $Ra = 1,09..1,74$ мкм, которые содержат требования к оборудованию, средствам технологического оснащения, режущему инструменту, а также к траектории его пути. Приведены рациональные режимы резания, позволяющие без потери производительности получить установленную шероховатость поверхности;

9. Рекомендуются продолжение исследований в направлении изучения контактных процессов в зоне резания и процесса формирования стружки. Также следует исследовать влияние геометрических параметров режущего инструмента, варьирование переднего угла γ , а также взаимного варьирования заднего α и переднего γ углов режущей кромки.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

a_c	толщина среза, мм
A_x	наклон линии тренда осевой силы резания
A_z	наклон линии тренда тангенциальной силы резания
t	глубина фрезерования
b	условный размер грани
b_0, b_1, b_2, b_3	постоянные коэффициенты
b_c	ширина среза
B_z, B_x	смещение линий тренда осевой и тангенциальной сил резания
$B_б$	боковая ширина фрезерования, мм
B_{oc}	осевая ширина фрезерования, мм
B_p	радиальная ширина фрезерования, мм
c	момент трения стружки об поверхность режущей кромки
C	длина окружности, мм
c_{ii}	диагональные элементы матрицы XX^{-1}
D	диаметр фрезы, мм
$D_{кон}$	диаметр режущей части фрезы определяется по точкам пересечения двух конусных поверхностей фрезы, мм
d	динамический показатель
$d(x_f)$	вибрации возникающие по направлению подачи
$db(z)$	длина контакта
$dS(z)$	бесконечно малая длина винтовой режущей части
dT	период врезания зуба
$d_{заг}$	диаметр заготовки
$d_{изд}$	диаметр изделия
e	угол наклона инструмента относительно заготовки
$e_{с max}$	максимальное отклонение пика «огранки», мм
f_E	число степеней свободы воспроизводимости
$F_{табл}$	табличное значение критерия Фишера.

h	высота рельефной поверхности
$h(t)$	мгновенное значение толщины срезаемого слоя
h_{end}	высота от торца фрезы до основного тела с постоянным диаметром, мм
$h_j(\phi_j, z)$	толщина срезаемого слоя
h_j^d	динамическая величина толщины срезаемого слоя
h_j^s	статическая величина толщины срезаемого слоя
$h_{рч}$	высота режущей части фрезы, мм
$HВ$	твёрдость по методу Бринелля
i	проход, шт
i, l	номера факторов;
IT	стандартный допуск, мм
j	номер опыта в матрице планирования
K, a_1, a_2, a_3	параметры исследуемой модели
K_a^μ	коэффициент утолщения стружки
k_{ac}	коэффициент аксиальной силы резания
k_{ae}	коэффициент аксиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности
k_{rc}	коэффициент радиальной силы резания
k_{re}	коэффициент радиальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности
k_{tc}	коэффициент тангенциальной силы резания
k_{te}	коэффициент тангенциальный для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности
k_{qc}	сумма коэффициентов сил резания на плоскости
k_{qe}	сумма коэффициентов для угла наклона инструмента относительно обрабатываемой поверхности
K_x	удельное давление резания в осевом направлении
K_z	удельное давление резания в тангенциальном направлении

K_{ZC}, K_{XC}	коэффициенты тангенциальной и осевой сил резания
K_{ZE}, K_{XE}	коэффициенты тангенциальной и осевой сил контакта
L	длина обработки, мм
l	базовая длина измерения, мм
l_c	длина среза, мм
$L_{заг}$	длина заготовки, мм
$L_{и}$	линейный размер режущей кромки инструмента, задействованной в работе, мм
l_k	вылет заготовки от кулачков, мм
$l_{рез}$	длина пути инструмента (длина резания), мм
Mr	длина проекции участка OM на ось X/Y, мм
N	число параллельных опытов, число опытов в матрице планирования, шт
n_0	число опытов в центре плана, шт
$n_{заг}$	частота вращения заготовки, об/мин
$n_{и}$	частота вращения шпинделя инструмента, об/мин
$n_{иmax}$	максимальная частота вращения шпинделя инструмента, об/мин
Nr	длина проекции участка ON на ось X/Y, мм
pd	момент демпфирования в результате контакта режущей кромки с уже обработанной поверхностью заготовки, имеющей определенный микропрофиль
Q	теплота, Дж
R	радиус режущей кромки инструмента, мм
R_w^e	фактический радиус заготовки, мм
R_z	расстояние от торца фрезы до точки C (по оси Z (осевая), мм
Ra	высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм
Rr	расстояние от оси фрезы до точки C по оси X/Y (радиальная), мм
s	статический показатель
$S^2(b_j)$	дисперсии коэффициентов регрессии

S^2y	дисперсия эмпирической регрессии
S_y	дисперсия j -го опыта матрицы
S_z	подача на зуб, мм/зуб
$S_{\text{мин}}$	минутная подача, мм/мин
$S_{\text{пр}}$	подача на оборот, мм/об
T	температура, °C
t	глубина резания, мм
t_{max}	максимальная температура работы инструмента
u	номер параллельного опыта в центре плана
v	скорость резания, м/мин
v_p	результатирующая скорость резания
W	производительность
X	матрица планирования эксперимента
x_0	фиктивная переменная
x_1, x_2, x_3	кодированные значения факторов
x_{ij}, x_{lj}	кодированные значение i -го и l -го факторов в j -м опыте
Y	результат исследуемой величины в экспериментах при фрезоточении, содержащий значения отклика зависимой величины в логарифмическом масштабе
y	отклонение профиля, выражающееся в расстоянии между любой точкой профиля и средней линией, мкм
YI	суммарное линейное перемещение инструмента. мм
y_{0u}	значение функции отклика в u -ом опыте
y_j	значение функции отклика в j -м опыте
\bar{y}_j	среднее арифметическое значение выходного параметра из n параллельных опытов в j -й точке матрицы планирования
Y_u	вектор значений функции отклика в центре плана
Z	количество зубьев фрезы
α	задний угол резца, ...°

α_{ae}	угол смещения фрезы, ...°
α_i	фазовый угол между положениями зубьев
α_1	угол отклонения первой конусной поверхности фрезы от оси X/Y, ...°
β	угол отклонения второй конусной поверхности фрезы от оси Z, ...°
β_a	угол между результирующей силой и перпендикуляром к передней поверхности, ...°
$\beta(z)$	угол наклона канавки на глубине z
κ_i^{j+1}	положение зуба (точка траектории на заготовке, оставленная инструментом) зубом $j+1$ в момент времени i
$\kappa_{i-T_d}^{*j}$	обновленная точка траектории после зуба j в момент времени $i-T_d$
γ	главный передний угол резца, ...°
θ	угловая скорость инструмента
$\tau_{j,i}$	величина запаздывания при регенерации поверхности
τ_s	касательные напряжения плоскости сдвига, равномерно распределяемые по плоскости
ϕ	угол поворота инструмента
φ_c	угол сдвига
$\phi_j(z)$	мгновенное значение угла j -го зуба
ϕ_p	расстояние между зубьями фрезы
ψ	угол наклона режущей кромки фрезы, мм
$\psi(z)$	угол запаздывания
P_x, P_y, P_z	проекции тангенциальной силы резания на соответствующие оси координат (X, Y, Z)
$T_{\text{маш}}$	машинное время, мин
$T_{\text{маш т}}$	машинное время токарной обработки, мин
$T_{\text{маш фт}}$	машинное время фрезоточения, мин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Abukhshim N.A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining / N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. Vol.46(7–8). – P.782–800.
2. Aleynikov D. Investigation of cutting force oscillations when high productivity milling/ D. Aleynikov, A. Lukyanov, A. Savilov, D. Paikin // *MATEC Web of Conferences*. Vol.224. – P. 01075.
3. Altintas Y. Chatter Stability of Metal Cutting and Grinding / Y. Altintas, M. Weck // *CIRP Annals*. – 2004. Vol.53(2). – P.619–642.
4. Altintas Y., and Lee, P. Mechanics and Dynamics of Ball End Milling. / Y. Altintas, P. Lee // *ASME. J. Manuf. Sci. Eng.* November 1998; 120(4): 684–692. <https://doi.org/10.1115/1.2830207>.
5. Armarego E.J.A. Fundamental studies of driven and self-propelled rotary tool cutting processes-II. Experimental investigation // E.J.A. Armarego, V. Karri, A.J.R. Smith / *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 1994. T.34(6). – P.803–815.
6. ASP®2012 is the best in class for high toughness up to 58 HRC in cold-, warm- and hot applications // Erasteel [Электронный ресурс]. URL: <https://www.erasteel.com/> (дата обращения 08.10.2023).
7. Blokhin D.A. The method for identifying of inaccuracy causes in turning machining center by processing a sample part / D.A. Blokhin, A.G. Koltsov, Yu.A. Blokhina, M.M. Lakman // *Omsk Scientific Bulletin*. – 2021. Vol.177. – P.24–29.
8. Boozarpoor M. Comprehensive study on effect of orthogonal turn-milling parameters on surface integrity of Inconel 718 considering production rate as constrain / M. Boozarpoor, R. Teimouri, K. Yazdani // *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. Elsevier Ltd. – 2021. Vol.4(2). – P.145–155.
9. Braiden P. Failure Of Carbide Tools In Interm Cutting / P. Braiden, D. Dugdale // *In Isi Symposium On Materials For Metal Cutting*. – 1971. – P.57–66.
10. Chen P. Cutting Temperature and Forces in Machining of High-Performance Materials with Self-Propelled Rotary Tool. // *JSME international journal*. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry. – 1992. Vol.35(1). – P.180–185.
11. Choudhury S.K. Investigation in orthogonal turn-milling towards better surface finish / S.K. Choudhury. J.B. Bajpai // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. Vol.170(3). – P.487–493.

12. Choudhury S.K. Investigation of orthogonal turn-milling for the machining of rotationally symmetrical work pieces / S.K. Choudhury, K.S. Mangrulkar // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2000. T.99(1). – P. 120–128.
13. Comak A. Mechanics, dynamics and stability of turn-milling operations. – 2018.
14. Ekinovic S. Comparison of machined surface quality obtained by high-speed machining and conventional turning / S. Ekinovic, E. Begovic, A. Silajdzija // *Machining Science and Technology*. – 2007. Vol.11(4). – P.531–551.
15. Engin S. Mechanics and dynamics of general milling cutters. / S. Engin, Y. Altintas // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2001. Vol.41(15). – P.2195–2212.
16. Felusiak-Czyryca A. Cutting Forces during Inconel 718 Orthogonal Turn-Milling / A. Felusiak-Czyryca, M. Madajewski, P. Twardowski, M. Wiciak-Pikuła // *Materials*. – 2021. Vol.14(20). – P.6152.
17. Filho M.C.J. Prediction of cutting forces in mill turning through process simulation using a five-axis machining center // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. Vol.58(1–4). – P.71–80.
18. Kara S., Li W. Unit process energy consumption models for material removal processes // *CIRP Annals*. 2011. T. 60, № 1. C. 37–40.
19. Karagüzel U. Analytical modeling of turn-milling process geometry, kinematics and mechanics / U. Karagüzel, U. Emre, B. Erhan, B. Mustafa // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier. – 2015. Vol.91. – P.24–33.
20. Karaguzel U. Cutting Temperature and Tool Wear in Turn-Milling / U. Karagüzel, E. Budak, M. Bakkal // *The 4th International Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT 2015) At: Vancouver Canada*. – 2015. Vol.86(1–4). – P.963–975.
21. Karaguzel U. Effects of tool axis offset in turn-milling process / U. Karagüzel, U. Emre, B. Erhan, B. Mustafa // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2016. Vol.231. – P.239–247.
22. Karaguzel U. High Performance Turning of High Temperature Alloys on Multi-Tasking Machine Tools / U. Karagüzel, U. Olgun, E. Uysal, E. Budak // *New Production Technologies in Aerospace Industry Lecture Notes in Production Engineering*. – 2014. – P.1–9.
23. Karaguzel U. Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes / U. Karagüzel, U. Olgun, E. Uysal, E. Budak, M. Bakkal // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. Vol.77(9–12). – P.1993–2004.

24. Karaguzel U. Mechanical and Thermal Modeling of Orthogonal Turn-milling Operation / U. Karagüzel, M. Bakkal, E. Budak // *Procedia CIRP*. –2017. Vol.58. – P.287–292.
25. Karaguzel U. Process modeling of turn-milling using analytical approach / U. Karagüzel, M. Bakkal, E. Budak // *Procedia CIRP*. – 2012. Vol.4. – P.131–139.
26. Kazak A. Powder metallurgy tool steel / A. Kazak, E.J. Dulis // *Powder metallurgy*. – 1978. Vol.2. – P.114–123.
27. Kirby E.D. Optimizing surface finish in a turning operation using the Taguchi parameter design method / E.D. Kirby, Zhe Zhang, Joseph C. Chen, Jacob Chen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2006. Vol.30(11–12). – P.1021–1029.
28. Korotkova L.P. Influence of production technology of powder high-speed steels on the complex of formed properties / L.P. Korotkova, A.N. Korotkov // *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. – 2022. Vol.65(12). – P.851–860.
29. Kulikov M.Y. Tool design peculiarities for milling / M.Y. Kulikov, D.V. Volkov // *Bulletin of Bryansk state technical university*. – 2018. T.– 2018. Vol.10. – P.12–19.
30. Liu Z. Characteristic of surface profile and roughness in micro turn-milling of aluminum alloy 2A12 / Z. Liu, X. Wang // *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)*. Xi'an, China: IET. – 2009. – P.46–46.
31. Matlygin G. Analysis of progressive machining technologies for rotating cutting tools / G. Matlygin, A. Savilov, T. Zarak // *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. – 2020. Vol. – 24(3). – P.498–513.
32. Mavliutov A.R. Optimization of cutting parameters for machining time in turning process / A.R. Mavliutov, E.G. Zlotnikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. Vol.327. – P.042069.
33. Merchant M.E. Mechanics of the Metal Cutting Process. I. Orthogonal Cutting and a Type 2 Chip // *Journal of Applied Physics*. – 1945. Vol.16(5). – P.267–275.
34. Neagu C. Fundamentals about processing straight shafts using face milling / C. Neagu, M. Gheorghe, A. Dumitrescu // *Proceedings of the 15th Conference on Production Research, Limeric*. – 1999. – P.95–98.
35. Neagu C. Fundamentals on face milling processing of straight shafts / C. Neagu, M. Gheorghe, A. Dumitrescu // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. Vol.166(3). – P.337–344.
36. Nikolaeva E.P. Effect of heat treatment conditions on structure and properties of high-speed steel / E.P. Nikolaeva, D.B. Vlasov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2017. Vol.177. – P.012113.

37. Nikolaeva E.P. Special Case of Destruction of the End Mill Made of HighSpeed Steel Powder // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. Vol. 969(1).
38. Otalora-Ortega H. Analytical modeling of the uncut chip geometry to predict cutting forces in orthogonal centric turn-milling operations / H. Otalora-Ortega, P.A. Osoro, P.J. Arrazola Arriola // International Journal of Machine Tools and Manufacture. Elsevier Ltd. – 2019. Vol.144(4) – P.103428.
39. Ozay C. The optimization of cutting parameters for surface roughness in tangential turnmilling using Taguchi method / C. Ozay, V. Savas // Advances in Natural and Applied Sciences. – 2012. Vol.6(6). – P.866–874.
40. Particle Size Analysis Report // Инсталль [Электронный ресурс]. URL: <https://instzinc.ru/about/>. (дата обращения 08.10.2023).
41. Peng F. An Investigation of Workpiece Temperature in Orthogonal Turn-Milling Compound Machining / F. Peng, Y. Liu, S. Lin, R. Yan, S. Yang, B. Li // Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2015. Vol.137(1). – P.011014
42. Ponomarev B.B. Dynamometer Choice for Cutting Force Measurement at End Milling. Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta / B.B. Ponomarev, S.H. Nguen // Bulletin of Bryansk State Technical University. – 2019. Vol.5. – P.15–24.
43. Pyatykh A.S. Improving effective output and hole processing quality based on cutting process dynamics estimation // Proceedings of Irkutsk State Technical University. – 2018. Vol.22(9). – P.67–81.
44. Qiu W. Cutting force prediction in orthogonal turn-milling by directly using engagement boundaries / W. Qiu, Q. Liu, J. Ding, S. Yuan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. Vol.86(1–4). – P.963–975.
45. Qiu W., Modeling of cutting forces in orthogonal turn-milling with round insert cutters / W. Qiu, Q. Liu, S. Yuan // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. Vol.78(5–8). – P.1211–1222.
46. Rahimzadeh Berenji K. Effects of turn-milling conditions on chip formation and surface finish / K. Rahimzadeh Berenji, U. Karagüzel, E. Özlü, E. Budak // CIRP Annals. CIRP. – 2019. T.68(1). – P.113–116.
47. Rao K.V. A Novel Approach for Minimization of Tool Vibration and Surface Roughness in Orthogonal Turn Milling of Silicon Bronze Alloy // Silicon. Silicon. – 2019. Vol.11(2). – P.691–701.
48. Ratnam Ch. Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA / Ch. Ratnam, K. Arun Vikram, B.S. Ben, B.S.N. Murthy// Measurement. Elsevier Ltd. – 2016. Vol.94. – P.221–232.

49. Ross P.J. Taguchi Techniques for Quality Engineering // Modern at large: Cultural dimensions of globalization. – 1996
50. Savas V. Experimental investigation of cutting parameters in machining of 100Cr6 with tangential turn-milling method / V. Savas, C. Ozay, H. Ballikaya // Advances in Manufacturing. Shanghai University. – 2016. Vol.4(1). – P.97–104.
51. Schulz H. High Speed Turn-Milling - A New Precision Manufacturing Technology for the Machining of Rotationally Symmetrical Workpieces / H. Schulz, G. Spur // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 1990. Vol.39(1). – P.107–109.
52. Schulz H. Kräfte und Antriebsleistungen beim Orthogonalen Drehfräsen (Forces and Drive Powers in Orthogonal Turn-Milling) / H. Schulz, T. Lehmann // Werkstatt und Betrieb. – 1990. Vol.123. – P.921–924.
53. Shimanuki K. Study on the relationship between material removal rate and tool flank temperature in orthogonal turn-milling / K. Shimanuki, A. Hosokawa, T. Koyano // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2021. Vol.15(4). P.20-00411.
54. Stephenson D.A. Tool temperatures in interrupted metal cutting / D.A. Stephenson, A. Ali // Journal of Engineering for Industry. – 1992. Vol.114(2). – P.127–136.
55. Tlustý J. Basic non-linearity in machining chatter / F. Ismail // CIRP Annals. – 1981. Vol.30(1). – P.299–304.
56. Tlustý J. Dynamics of cutting forces in end milling / P. MacNeil // CIRP Annals. – 1975. Vol.24(1). – P.21–25.
57. Tlustý J. What's new in metalcutting research // American machinist and automated manufacturing. – 1987. Vol.131(10). – P.74–75.
58. T-Max P cutting unit for turning C6-DDNNN-00065-15 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/en-us/product-details?c=c6-ddnnn-00065-15> (дата обращения 08.10.2023).
59. Turbine and Engine Parts (Aerosp) // Böhler. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.Böhler.de/en/> (дата обращения 08.10.2023)
60. Yamnikov A.S. Physical modeling of cutter lathe thread turn milling THREAD / A.S. Yamnikov, O.A. Yamnikova, D.I. Troitskiy // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2015. Vol. 1(51). – P.207–211.
61. Yan R. The effect of variable cutting depth and thickness on milling stability for orthogonal turn-milling / R. Yan, X. Tang, F.Y. Peng, Y.Wang, F. Qiu // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2016. Vol.82(1–4). – P.765–777.
62. Yildiz T. The Optimization of Abrasive Wear Behavior of Fecrc Coating Composite with Taguchi Method / T. Yildiz, A.K. GUR // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. – 2011. Vol.5(12). – P.2394–2402.

63. Zenghui J. Modeling and simulation on surface texture of workpiece machined by tangential turn-milling based on matlab / J. Zenghui, L. Xin, D. Xiaoye // 2011 2nd International Conference on Artificial Intelligence, Management Science and Electronic Commerce (AIMSEC). IEEE. – 2011. Vol.20092 058. – P.4072–4075.
64. Zhang J.Z. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method / J.Z. Zhang, J.C. Chen, E.D. Kirby // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. Vol.184(1–3). – P.233–239.
65. Zhu L. Experimental investigation on 3D chip morphology properties of rotary surface during orthogonal turn-milling of aluminum alloy / L. Zhu, X. Jin, C. Liu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. Vol.84(5–8). – P.1253–1268.
66. Zhu L. Research on rotary surface topography by orthogonal turn-milling / L. Zhu, H. Li, W. Wang // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2013. Vol.69(9–12). – P.2279–2292.
67. Zhu L., Analytical modeling on 3D chip formation of rotary surface in orthogonal turn-milling / L. Zhu, H. Li, C. Liu // Archives of Civil and Mechanical Engineering. No longer published by Elsevier. – 2016. Vol.16(4). – P.590–604.
68. Zubkov N. Cutting tool materials for edge tool manufacturing // Science and Education of the Bauman MSTU. – 2013. Vol.13(5). – P.75–10.
69. Агашков С.Н. Новые процессы передела отходов быстрорежущих сталей / С.Н. Агашков, А.К. Машков, В.П. Сабуров // ОНВ. – 1998. Т.2.
70. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. Москва: Наука, 1976. – С.279.
71. Балла О.М. Фрезы и фрезерование. О.М. Балла, А.И. Промптов, А.В. Савилов. Иркутск: Иркутский государственный технический университет. – 2006. 170 С.
72. Богданов К.В. Производство высокопроизводительного режущего инструмента в условиях ИАЗ / К.В. Богданов, Д.С. Никулин, А.В. Савилов, Е.П. Николаева, А.Е. Родыгина, // Наука и технологии в промышленности. – 2013. Т.1–2. – С.91–95.
73. Гатиулин М.Н. Ротационное резание как качественный скачок в эволюции режущих инструментов / М.Н. Гатиулин С.Д. Сметанин // Альманах современной науки и образования. – 2009. Т.12(31). – С.17–19.
74. Гиршов В.Л. Металлорежущий инструмент из порошковой стали с дисперсной структурой и алмазоподобным нанопокрытием / В.Л. Гиршов, П.А. Тополянский // Металлообработка. – 2009. Т.1(49). – P.43–49.
75. Гиршов В.Л. Техничко-экономические преимущества порошковых быстрорежущих сталей // Металлообработка. – 2001. Т.4. – С.40–42.

76. Грановский Г.И. Кинематика резания. – 1948. 323 С.
77. Грязев М.В. Геометрия поперечного сечения поверхностей вращения, обработанных фрезерованием / М.В. Грязев, Степаненко А.В. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. (4872). – С.9–11.
78. Грязев М.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием / М.В. Грязев, Степаненко А.В. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2010. Т.– 2(1). – С.130–136.
79. Данилов А.А. Анализ и реализация схем полигонального течения многогранных поверхностей // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2016. Т.11. – С.19–27.
80. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Температура в зоне резания при обработке эластичными абразивными кругами / Ю.В. Димов, Д.Б. Подашев // ВЕСТНИК ИрГТУ. – 2015. Т.– 2(97). – С.38–42.
81. Ермаков Ю. М. Комплексные способы эффективной обработки резанием. М.: Машиностроение. – 2005. – 272 С.
82. Индаков Н.С. Особенности ротационного течения многогранными резаками / Н.С. Индаков, А.Р. Бинчуров // Вестник машиностроения. – 2013. Т.10. – С.56–58.
83. Каширин А.И. Технология машиностроения. МАШГИЗ, 1949. 635 с.
84. Короткова Л.П., Шатько Д.Б. Контроль качества инструментальных материалов: учеб. пособ. Кемерово: Изд-во КузГТУ. – 2010. 164 с.
85. Куликов М. Определение оптимальной геометрии дисковой фрезы для операций фрезоточения / М. Куликов, Д. Волков // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. Т.– 22(12). – С.75–85.
86. Куц В.В. Моделирование поверхности резания при полигональном течениях гранных поверхностей / В.В. Куц, М.Р. Разумов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. Т.8(1). – С.105–111.
87. Лашнев С.И. Расчет параметров производящей поверхности фрезы — протяжки для обработки круглых резьб / С.И. Лашнев, Е.В. Серова // Автоматизированные станочные системы и роботизация производства: сб. науч. тр. Тула: ТулГТУ. – 1993. – С.87–92.
88. Мазур Н.П., Внуков Ю.Н., Грабченко А.. Основы теории резания материалов: учебник [для высш. учебн. заведений]. Харьков: НТУ «ХПИ». – 2013. 534 С.
89. Малышев В.И. Технология изготовления режущего инструмента. Старый Оскол: ТНТ. – 2022. 440 С.
90. Малько Л.Р. Ротационное течение винтовой поверхности крупногабаритных деталей // СТИН. – 2007. Т.11. – С.39–40.

91. Матлыгин, Г. В. Анализ прогрессивных технологий механообработки осевых режущих инструментов / Г. В. Матлыгин, А. В. Савилов, Т. В. Зарак // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24, № 3(152). – С. 498-513. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-3-498-513. – EDN XADBSP.
92. Мусаев М.М. Проблемы обработки деталей типа тел вращения в условиях машиностроительных производств РК / М.М. Мусаев, К.Т. Шеров // Инновационные технологии в машиностроении. Юрга-Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – 2017. – С.93–97.
93. Николаева Е.П. Применение инновационных средств для контроля качества инструмента из быстрорежущих сталей / Е.П. Николаева, Д.Р. Никулин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. Т.– 2(50). – С.73–80.
94. Николаева Е.П. Применение магнитных методов для контроля качества изделий из инструментальных сталей / Е.П. Николаева, А.Ю. Николаев // Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов II Всероссийской с международным участием научно-технической конференции. Иркутск: Иркутский государственный технический университет. – С.338–344.
95. О’Бриен. Как нужно работать на токарном станке. – 1919.
96. От достигнутых целей к новым горизонтам // Полема [Электронный ресурс]. URL: <http://www.polema.net>. (дата обращения 08.10.2023).
97. Полетаев В.А. Комбинированная обработка поверхностей тел вращения фрезерованием и фрезоточением с учетом технологического обеспечения их динамической устойчивости. – 2001. 432 С.
98. Пярых А.С. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки. / А.С. Пярых, А.В. Савилов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – С.211–216.
99. Разумов М.С. Расчёт погрешности многогранного профиля при формообразовании однорезцовым блоком с помощью планетарного механизма построителя / М.С. Разумов А.И. Пыхтин, А.В. Масленников // СТИН. – 2012. Т.4. – С.12–16.
100. Резников А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. М.: Машиностроение, 1990. – 288 С.
101. Резников А.Н. Теплообмен при резании и охлаждении инструментов. М.: Машгиз., 1963. – 200 с.
102. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.

103. Савилов А.В. Исследование обрабатываемости резанием быстрорежущей стали / А. В. Савилов, С. А. Тимофеев, Г. В. Матлыгин, В. А. Ушаков // *Машиностроение: сетевой электронный научный журнал*. – 2023. – Т. 10, № 1. – С. 14-18. – DOI 10.24892/RIJE/20230103. – EDN ZGJFBH.

104. Савилов А.В. Современное состояние производства высокопроизводительного режущего инструмента из порошковых быстрорежущих сталей и твердых сплавов / А.В. Савилов, Д.С. Никулин, Е.П. Николаева, А.Е. Родыгина // *ВЕСТНИК ИрГТУ*. – 2013. Т.6(3952). – С.26–33.

105. Савилов А.В. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования / А.В. Савилов, А.С. Пярых, С.А. Тимофеев // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2013. Т.6(2). – С.476–479.а

106. Свинин В.М., Савилов А.В., Шутенков А.В., Панин М.А. подавление автоколебаний при токарной обработке программной модуляцией скорости резания системы числового программного управления станка. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018;22(12):115-124. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2018-12-115-124>

107. Селиванов А.Н. Анализ технологических возможностей фрезоточения. / А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2020. – С.66–71.

108. Селиванов А.Н. Обеспечение качества обработки валов из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения / А.Н. Селиванов, Т.Г. Насад // *Вестник Саратовского государственного технического университета*. – 2010. Т.3(1). – С.55–61.

109. Селиванов А.Н. Повышение производительности и качества обработки тел вращения из титановых сплавов методом высокоскоростного фрезерования и фрезоточения. Автореферат диссертации. – 2011

110. Серебренникова А.Г. Исследование зависимости сил резания от геометрических параметров токарного резца / А.Г. Серебренникова, А.С. Пярых, С.А. Тимофеев // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири : Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, Иркутск, 12–15 апреля 2017 года / Иркутский национальный исследовательский технический университет / под ред. Бобарика И.О., Лыткина А.А.* – 2017. – С.241–246.

111. Серебренникова А.Г. Титановый сплав ВТ22: исследование зависимости выходных параметров токарной обработки от геометрии режущего инструмента / А.Г. Серебренникова, В.А. Гурылев // *ВЕСТНИК ИрГТУ*. – 2020. Т.3(152). – С.548–560.

112. Серков А.С. Проблемы ротационной обработки точения металла / А.С. Серков, А.С. Бородовицин, Н.А. Гречухин // *Н: сборник статей по*

материалам XIX международной студенческой научно-практической конференции – 2017. Т.8(19). – С.128–131.

113. Симонян М.М. Исследование влияния температурных колебаний и адгезионных явлений на стойкость твердосплавного инструмента при прерывистом резании / М.М. Симонян, М.О. Навоян, Н.Э. Казарян // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. – 2022. Т.2. – С.44–54.

114. Солянкин Д.Ю. Методика расчета сил резания при фрезоточении / Д.Ю. Солянкин, А.С. Ямников, О.А. Ямникова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. Т.3. – С.287–292.

115. Солянкин Д.Ю. Фрезоточение разнонаправленных на примере обработки радиаторных ниппелей. Автореферат диссертации. Издательство ТулГУ. – 2011. – 20 С.

116. Степаненко А.В. Исследование точности профиля продольного сечения при фрезеровании наружных цилиндрических поверхностей // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. Т.9. – С.102–108.

117. Степаненко А.В. Оборудование и технологическая оснастка для практической реализации процесса фрезерования тел вращения // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2012. Т.148(4872). – С.148–162.

118. Хохлова Г.И. Развитие инновационной и инвестиционной деятельности авиастроительных корпораций России / Г.И. Хохлова, А.А. Анастасина // Финансовая экономика. – 2021. Т.5. – С.338–340.

119. Что такое успешное фрезерование? [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/milling/pages/surface-generation.aspx>. (дата обращения 08.10.2023).

120. Шеров К.Т., Мусаев М.М. Универсальное устройство для токарного станка / Заявление даче патента РК на изобретение.

121. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. – 1964.

122. Ямников А.С. Физическое моделирование фрезоточения резьбы / А.С. Ямников, О.А. Ямникова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2017. Т.8(1). – С.48–58.

123. Ямников А.С. Экспериментальное определение силы резания при фрезоточении резьбы / А.С. Ямников, О.А. Ямникова // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. Т.1. – С.82–93.

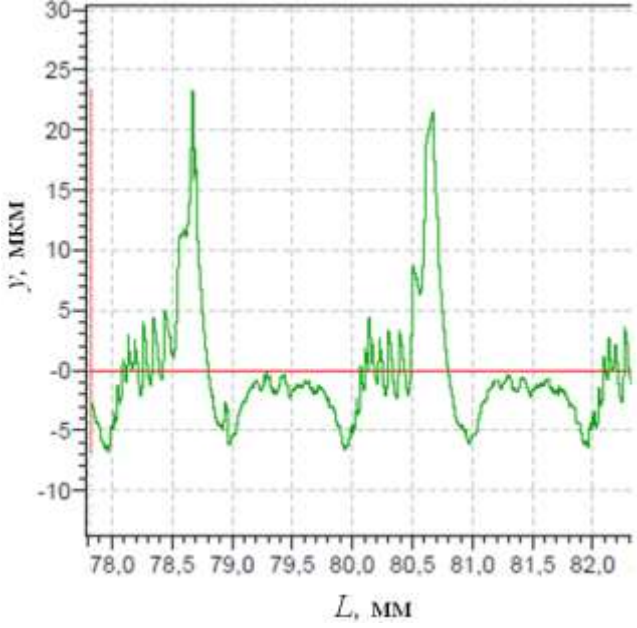
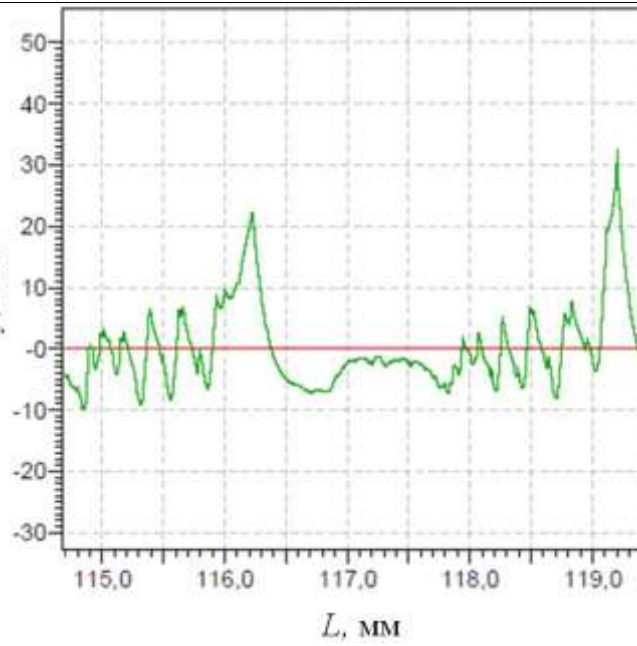
ПРИЛОЖЕНИЕ А

П.1. Результаты измерений шероховатости поверхности

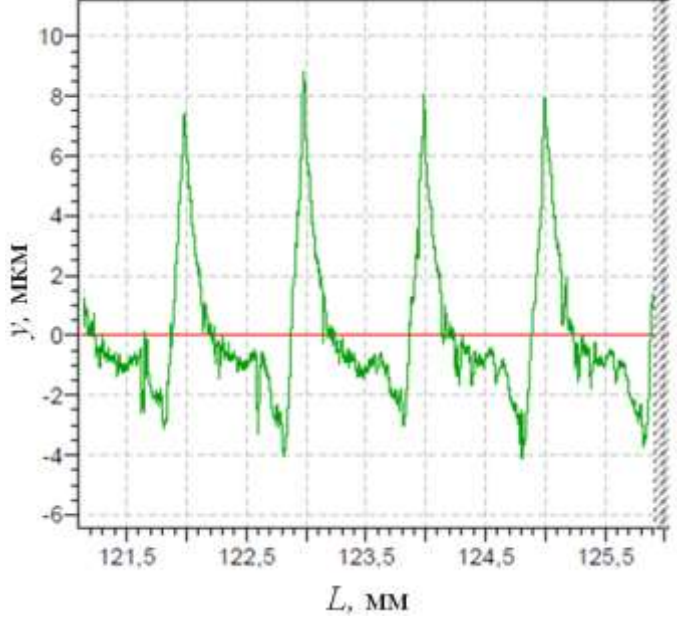
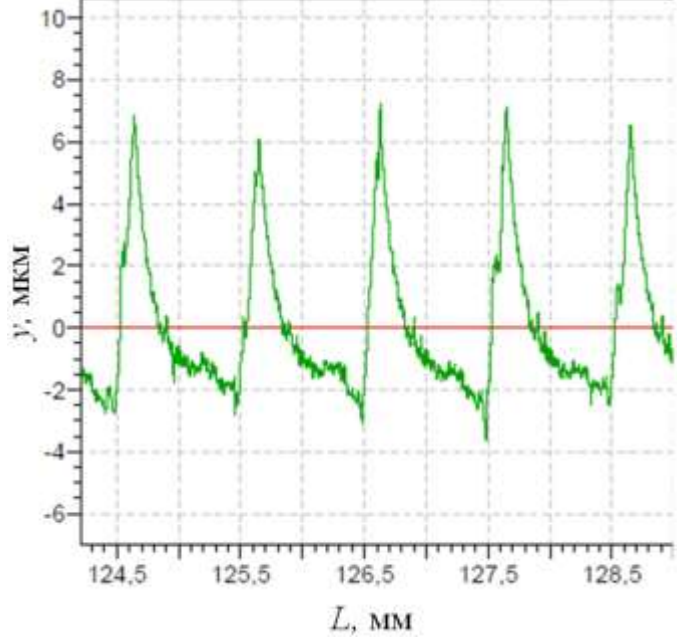
П.1.1. Профилограмма поверхности при обработке фрезой со сменными многогранными пластинами заготовки из сплава Vöhrler S390

Режимы резания	Результаты измерений		Измеренный профиль поверхности
	Ra , мкм	Rz , мкм	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{oc} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 150 \text{ м/мин}$	3,3235	16,0958	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{oc} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	3,2784	18,3445	

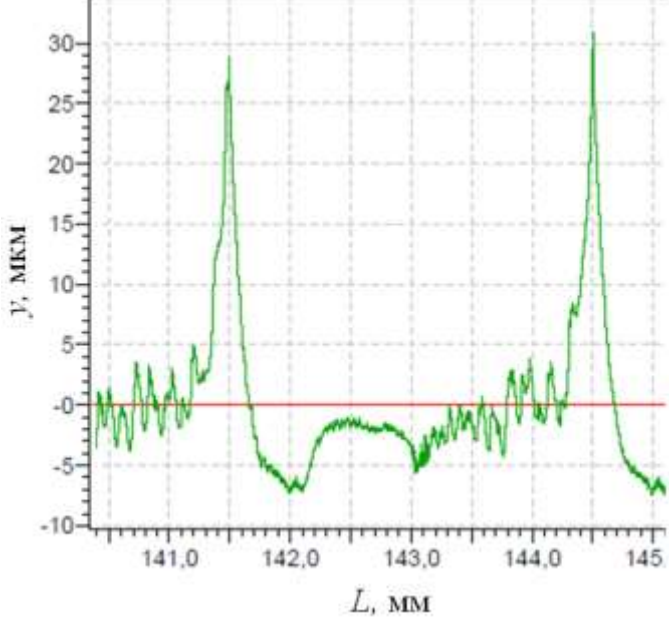
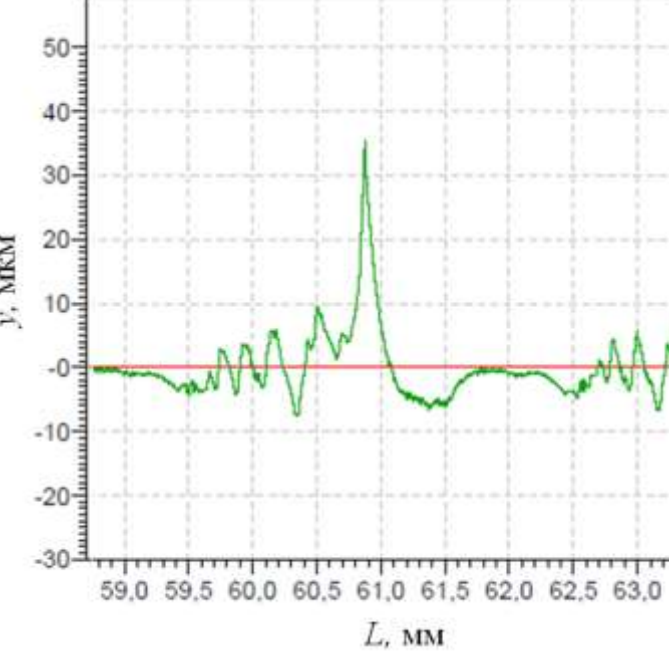
Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 210 \text{ м/мин}$	3,5199	18,2346	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 210 \text{ м/мин}$	4,9491	22,1239	

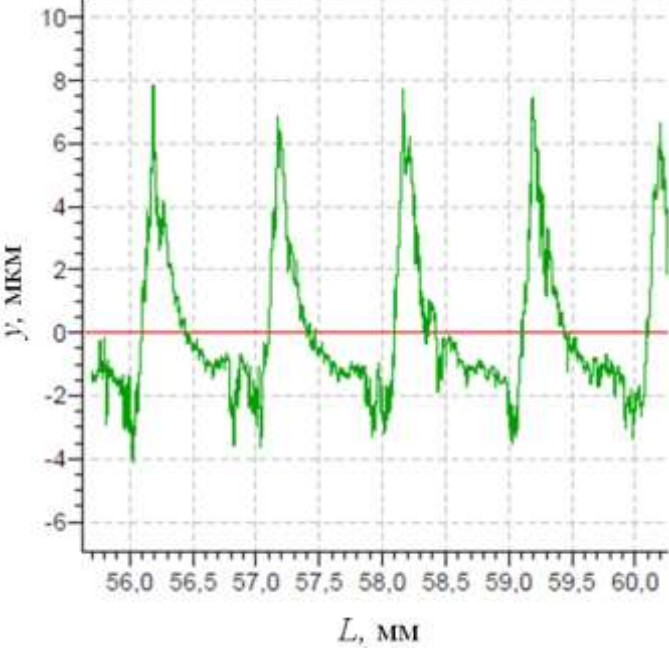
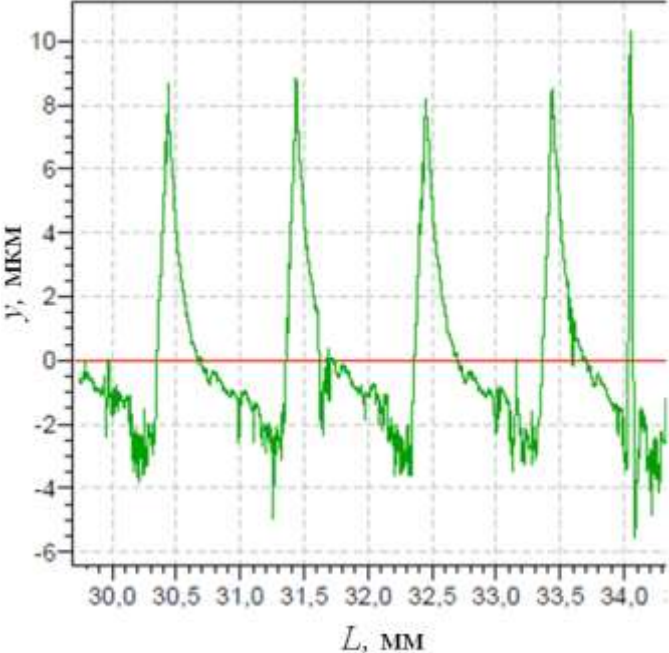
Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	1,7340	9,7264	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	1,806	9,4758	

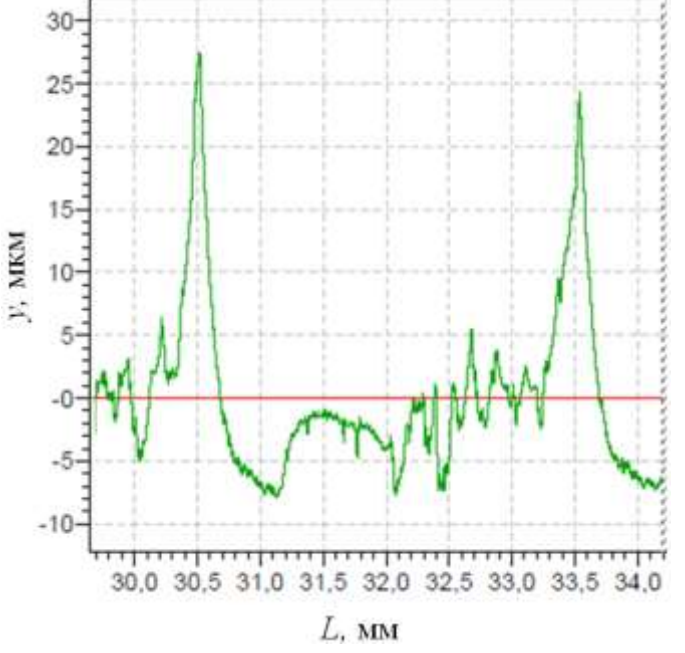
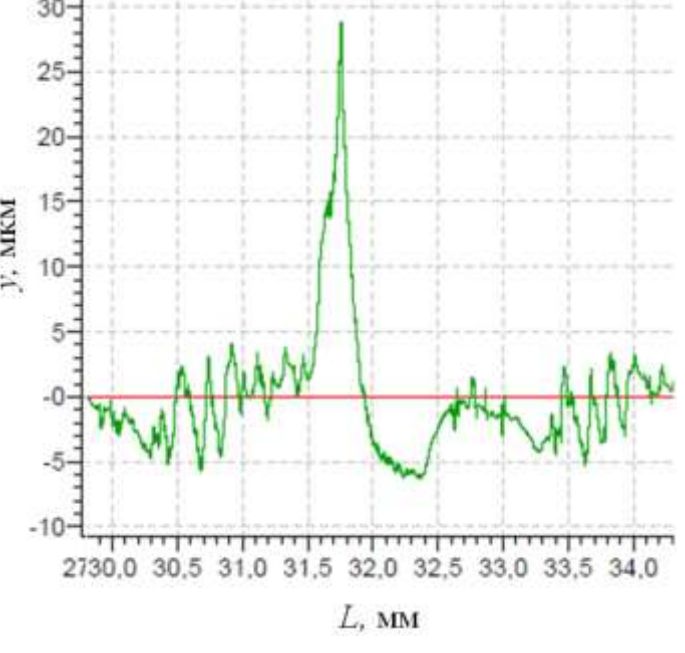
Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	4,1637	17,6622	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	3,2942	14,8475	

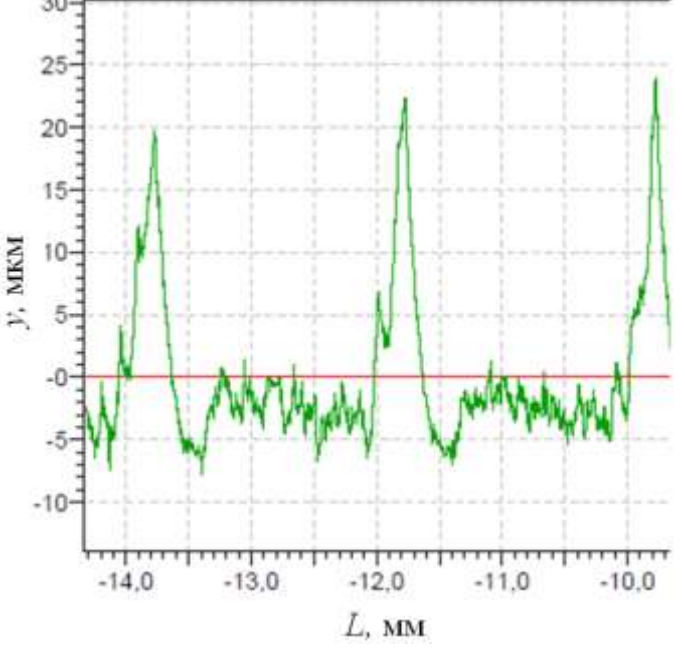
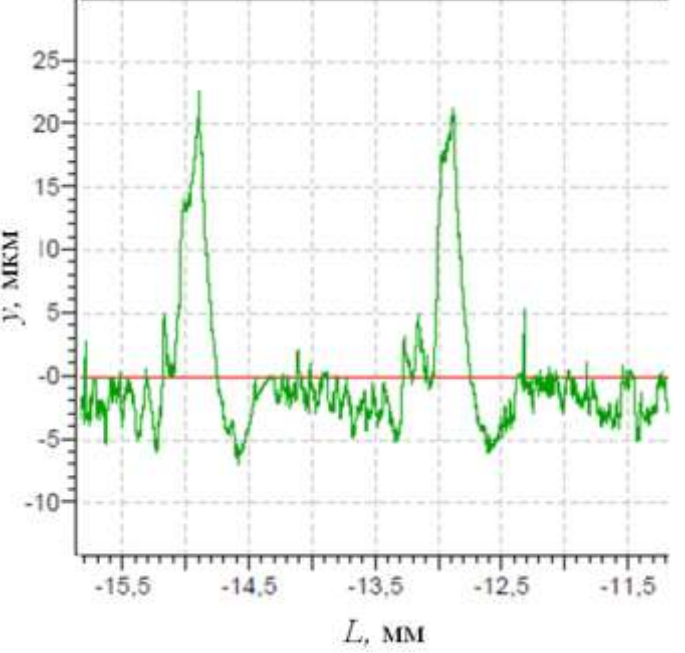
Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 150 \text{ м/мин}$	1,7863	10,1780	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 210 \text{ м/мин}$	2,0681	12,3754	

Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 150 \text{ м/мин}$	4,4041	17,4385	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 210 \text{ м/мин}$	3,0376	12,6142	

Продолжение таблицы П.1.1

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	4,3253	19,1797	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	3,3692	16,3295	

Продолжение таблицы П.1.1

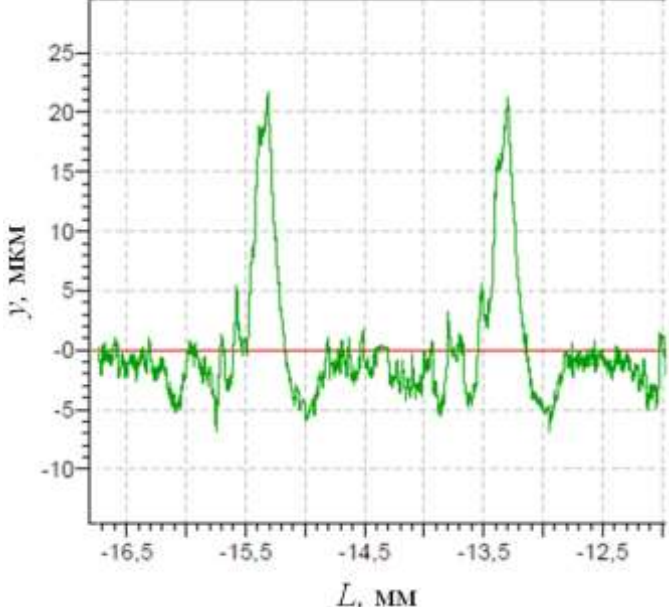
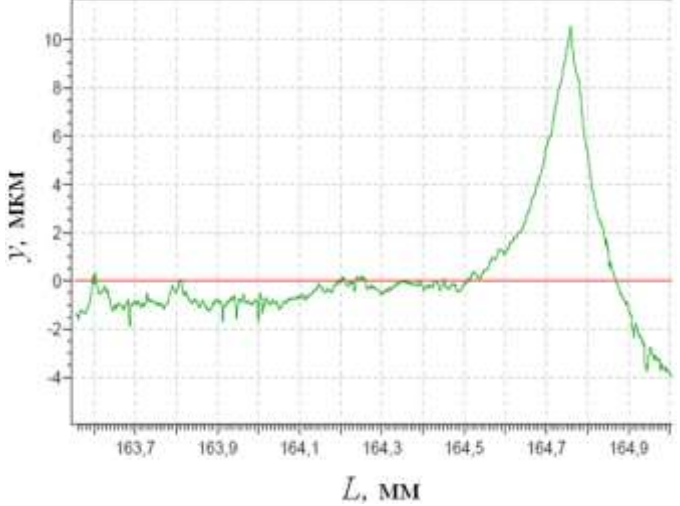
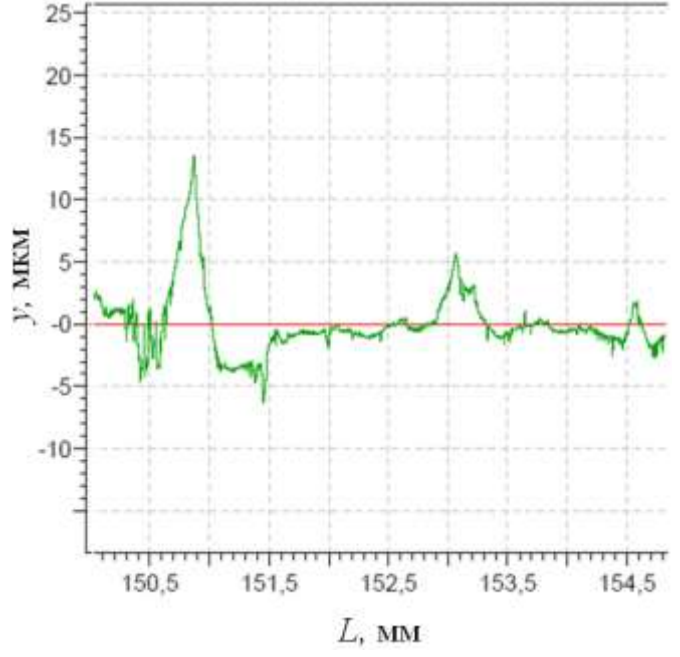
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	3,2269	14,2992	
---	--------	---------	--

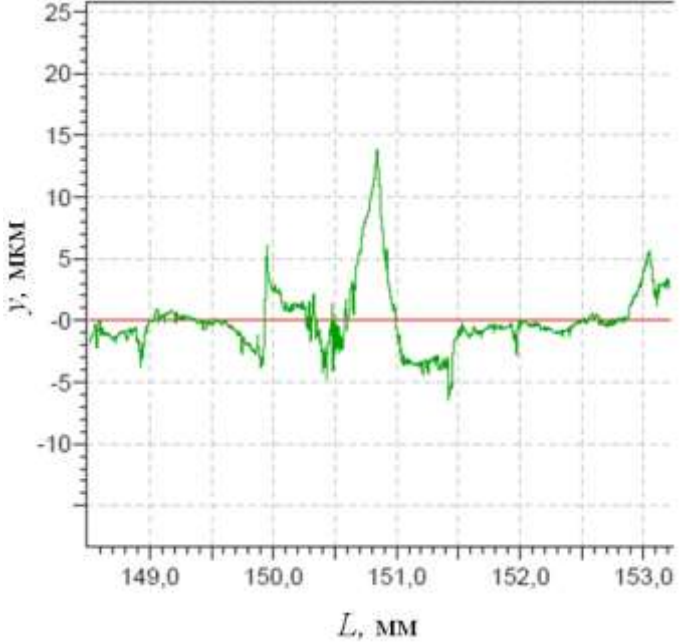
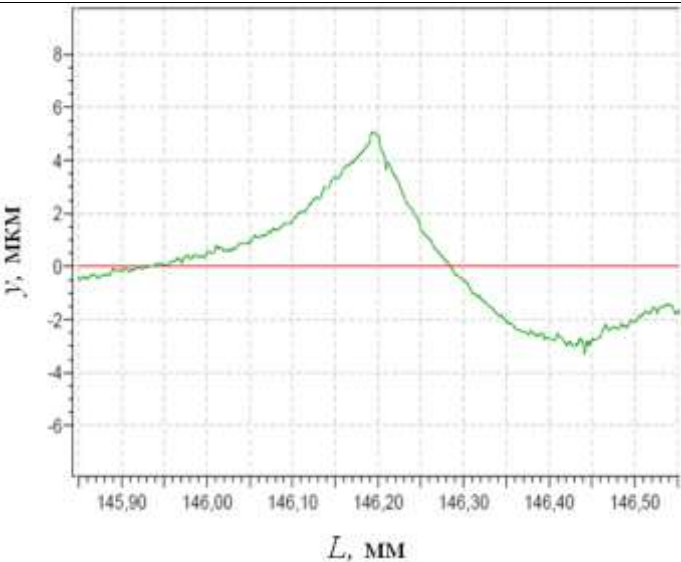
Таблица П.1.2. Профилограмма поверхности при обработке монолитной фрезой заготовки из сплава Vöehler S390

Режимы резания	Результаты измерений		Измеренный профиль поверхности
	$R_a,$ мкм	$R_z,$ мкм	
$S_z = 0,04 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 80 \text{ м/мин}$	1,7365	8,2539	

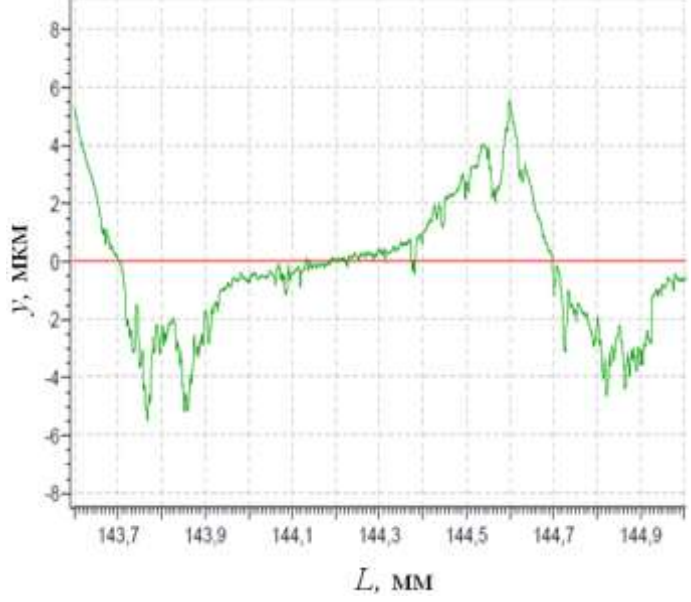
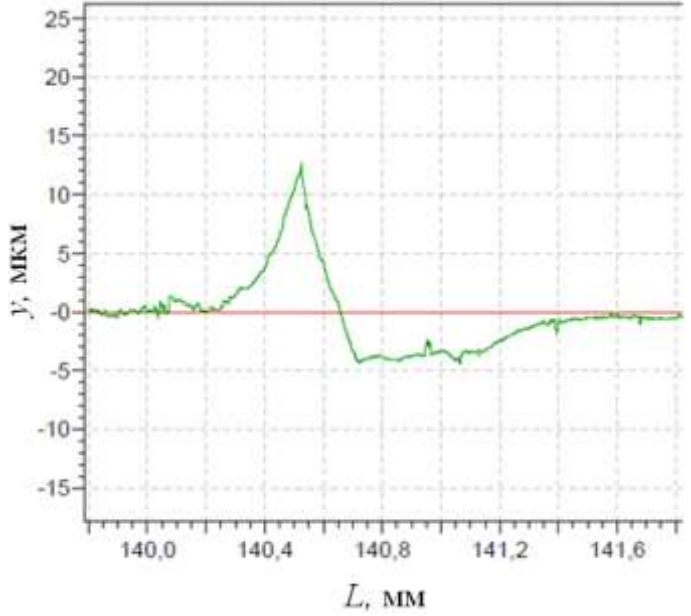
Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,6035	8,8058	
$S_z = 0,04 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,6555	8,7376	

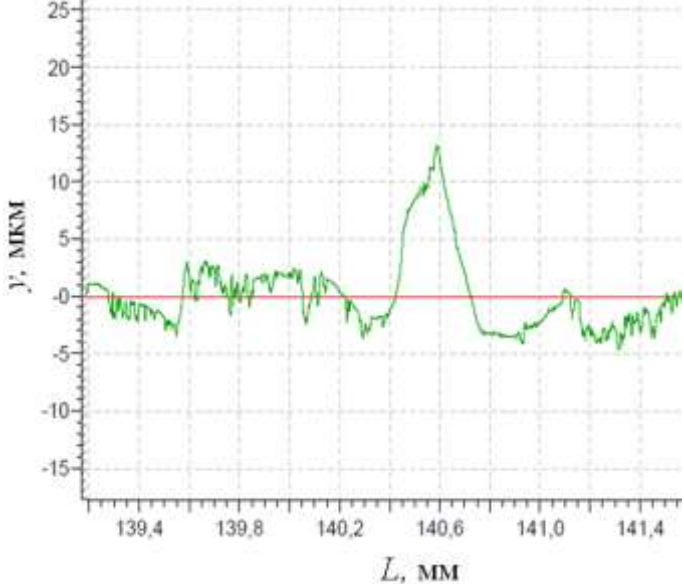
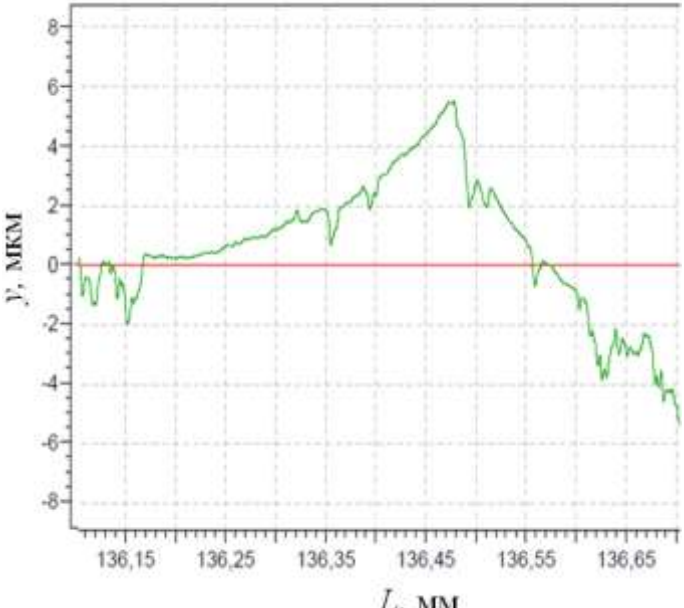
Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,7555	10,0491	
$S_z = 0,04 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 90 \text{ м/мин}$	1,5674	8,3616	

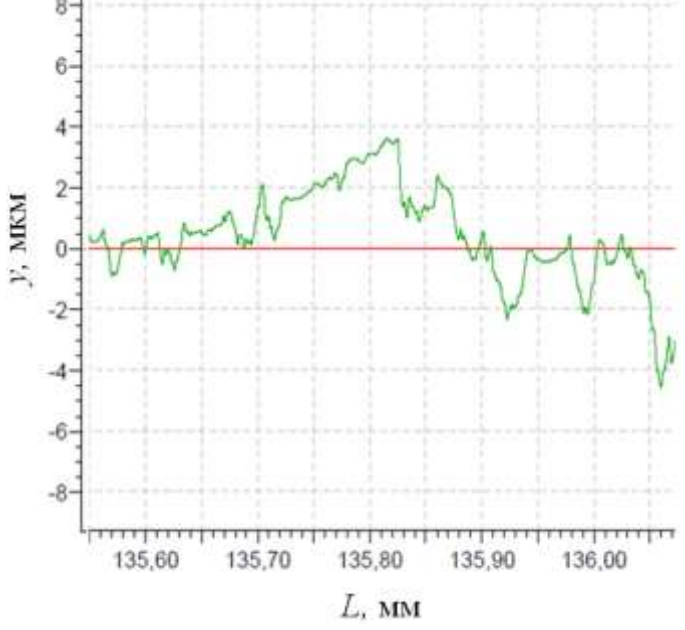
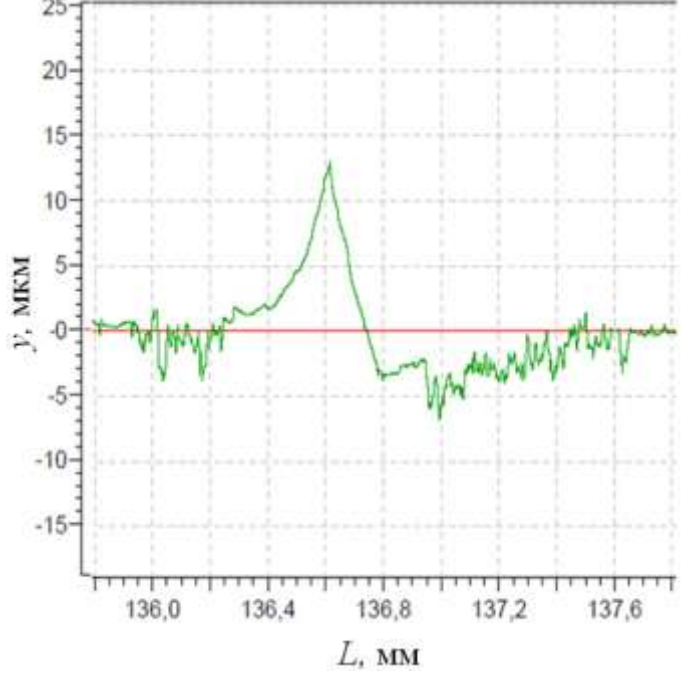
Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 90 \text{ м/мин}$	1,8302	10,898	
$S_z = 0,04 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 90 \text{ м/мин}$	1,5198	6,4945	

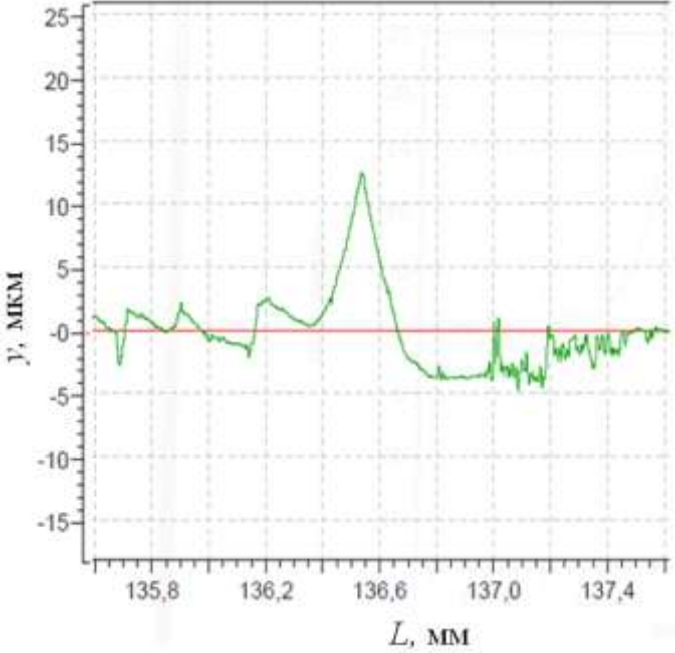
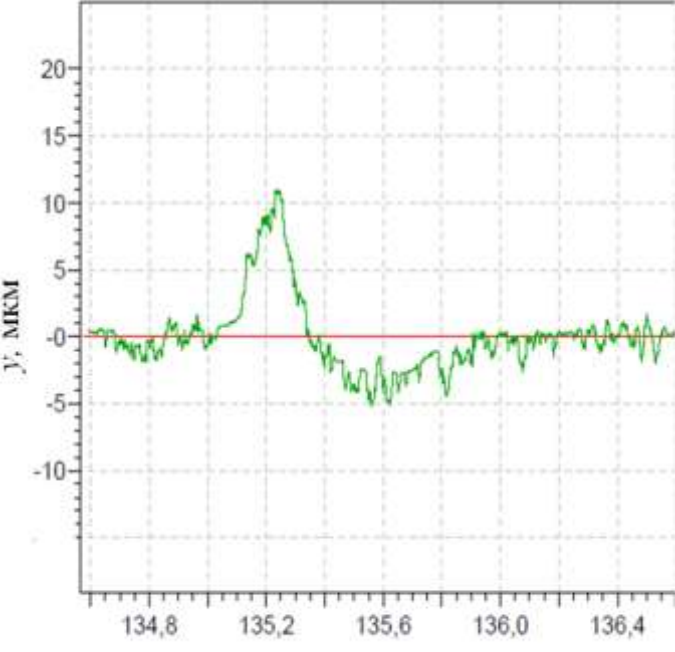
Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{oc} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 90 \text{ м/мин}$	1,9505	10,5444	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{oc} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 80 \text{ м/мин}$	1,8912	11,194	

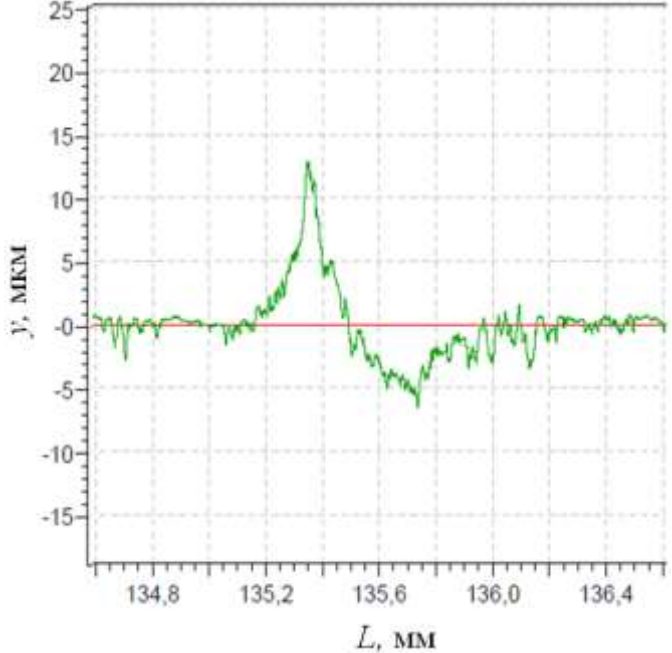
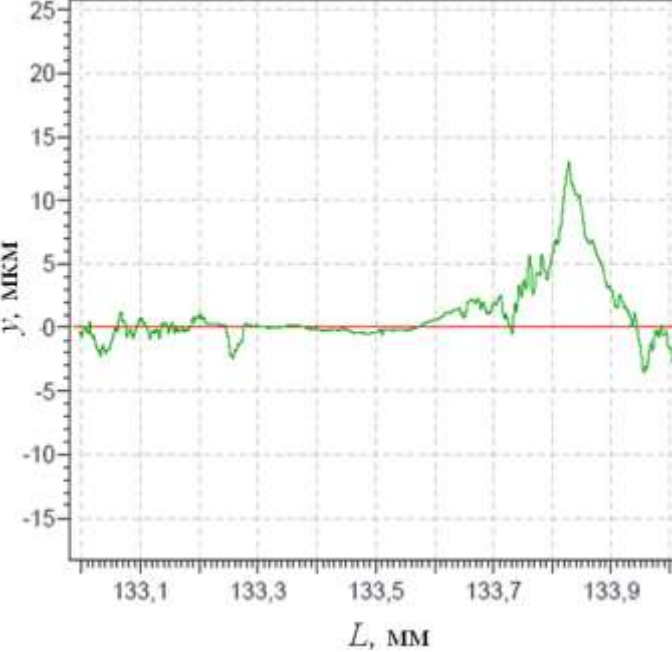
Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,0914	8,1695	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 1 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,7845	9,4931	

Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 3 \text{ мм};$ $v = 100 \text{ м/мин}$	1,6506	9,602	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 90 \text{ м/мин}$	1,5492	9,6581	

Продолжение таблицы П.1.2

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 90 \text{ м/мин}$	1,5081	9,3513	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 90 \text{ м/мин}$	1,7958	11,2151	

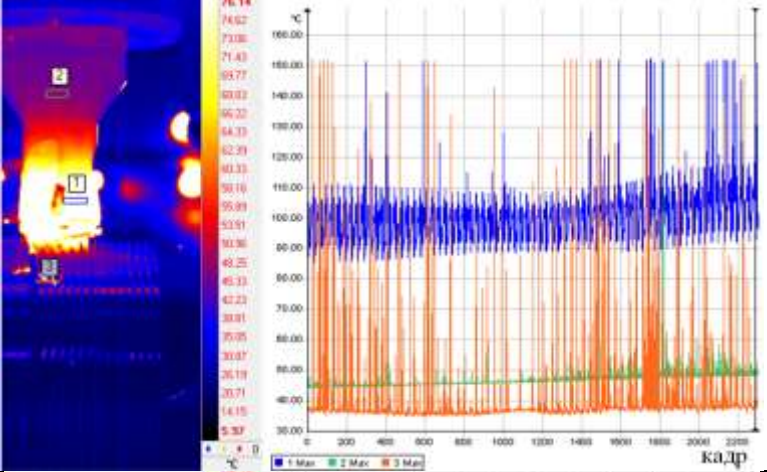
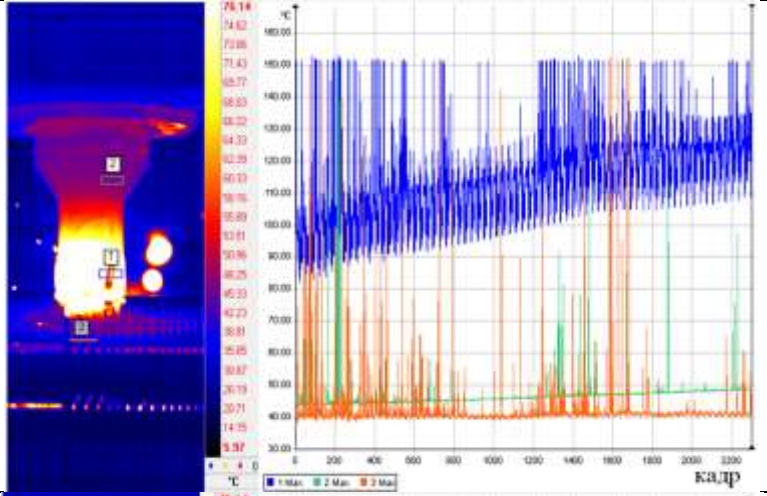
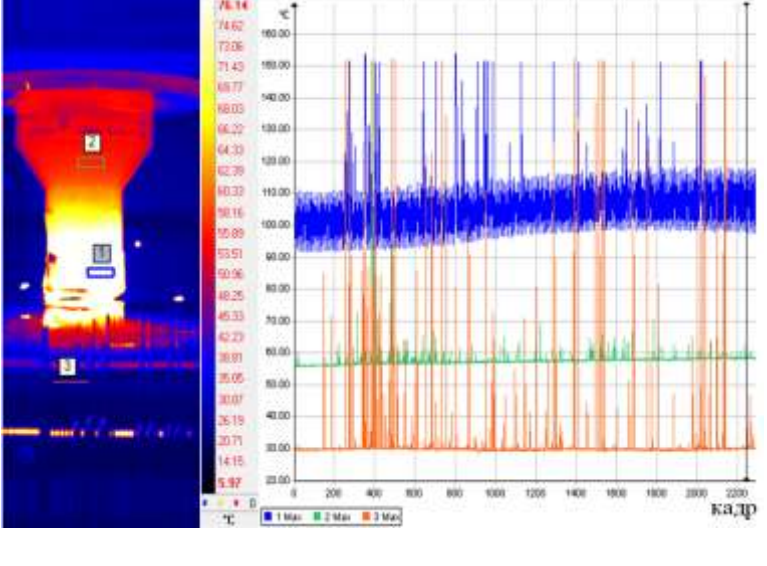
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

П.2. Результаты измерений температуры в зоне резания

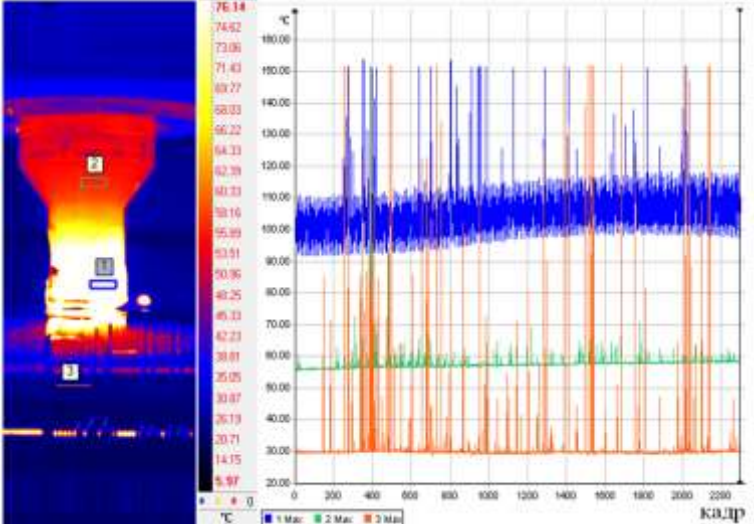
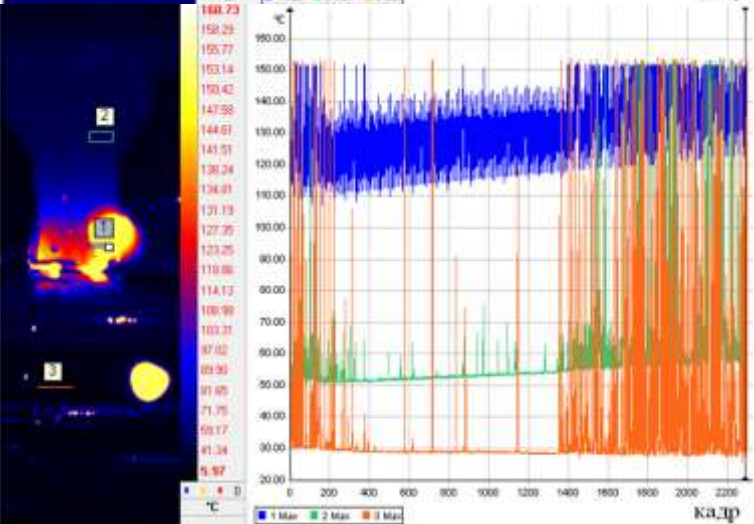
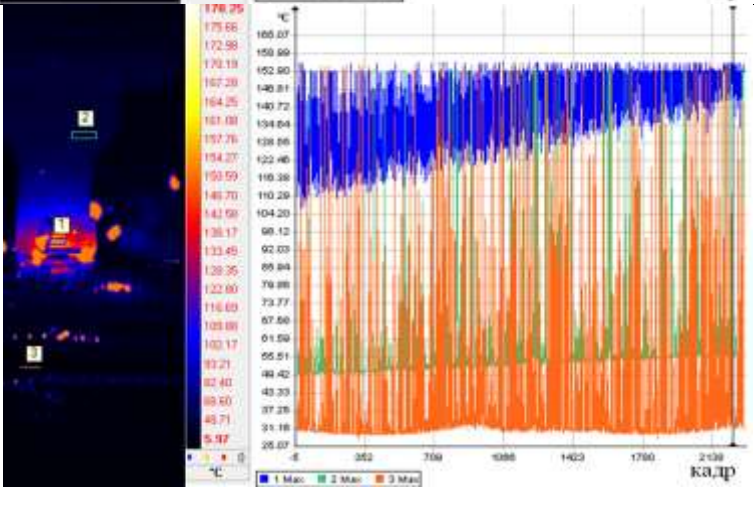
Таблица П.2.1. Результаты анализа температуры в зоне резания при фрезоточении фрезой со сменными многогранными пластинами заготовки из сплава Böhler S390

Режимы резания	Результаты измерений T_{\max} , °C	Термография зоны обработки / график зависимости температур
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 150 \text{ м/мин}$	[1] - 95,29 [2] - 47,94 [3] - 37,71	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	[1] - 95,23 [2] - 47,62 [3] - 39,26	

Продолжение таблицы П.2.1

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	[1] - 116,94 [2] - 53,73 [3] - 45,05	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	[1] - 135,03 [2] - 48,75 [3] - 41,47	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 118 [2] - 58,39 [3] - 30,24	

Продолжение таблицы П.2.1

$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 113,35 [2] - 60,68 [3] - 36,35	
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 145,97 [2] - 63,58 [3] - 37,88	
$S_z = 0,16 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 153,08 [2] - 59,64 [3] - 34,85	

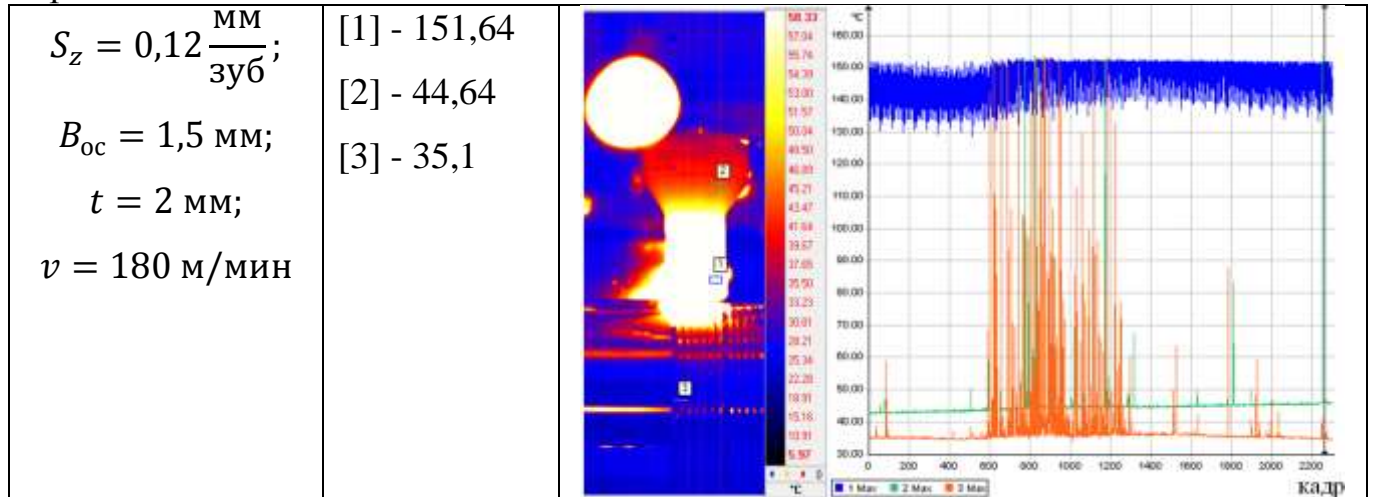
Продолжение таблицы П.2.1

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 150 \text{ м/мин}$	[1] - 122,4 [2] - 36,1 [3] - 29,71	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 1 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	[1] - 156,46 [2] - 35,45 [3] - 27,84	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 150 \text{ м/мин}$	[1] - 155,53 [2] - 39,89 [3] - 28,94	

Продолжение таблицы П.2.1

$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 3 \text{ мм}$; $v = 210 \text{ м/мин}$	[1] - 152,85 [2] - 42,44 [3] - 29,15	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 152,81 [2] - 37,34 [3] - 31,85	
$S_z = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}}$; $B_{\text{oc}} = 1,5 \text{ мм}$; $t = 2 \text{ мм}$; $v = 180 \text{ м/мин}$	[1] - 152,45 [2] - 42,19 [3] - 33,39	

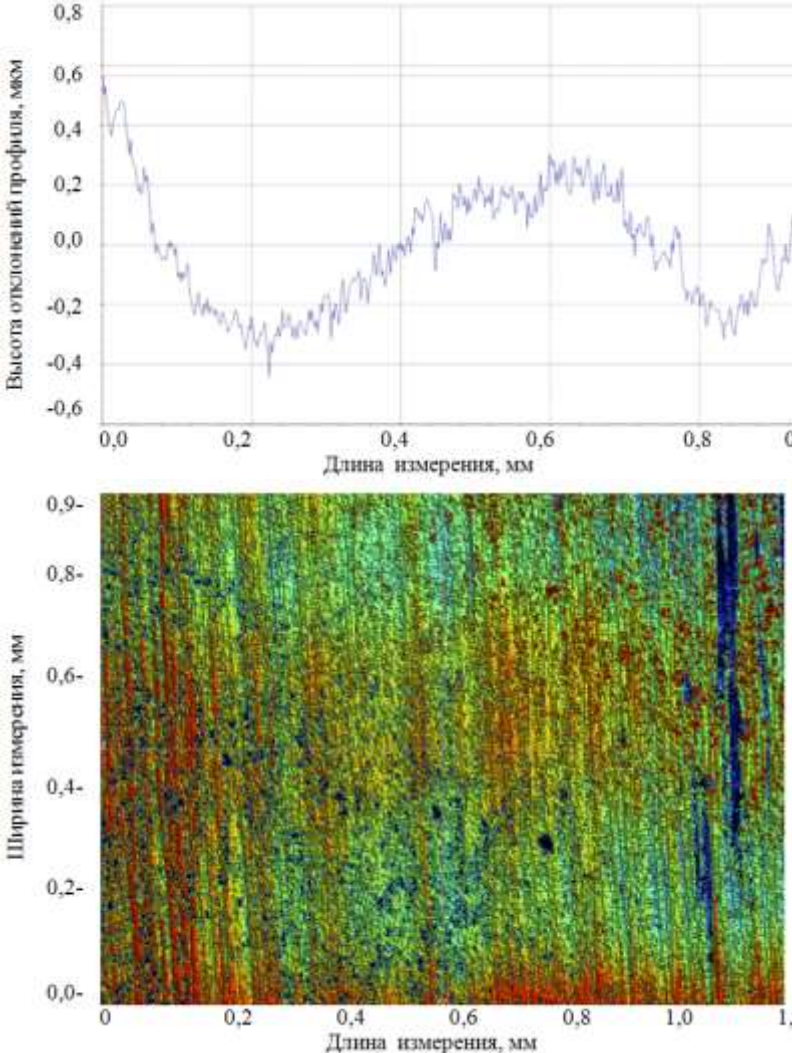
Продолжение таблицы П.2.1



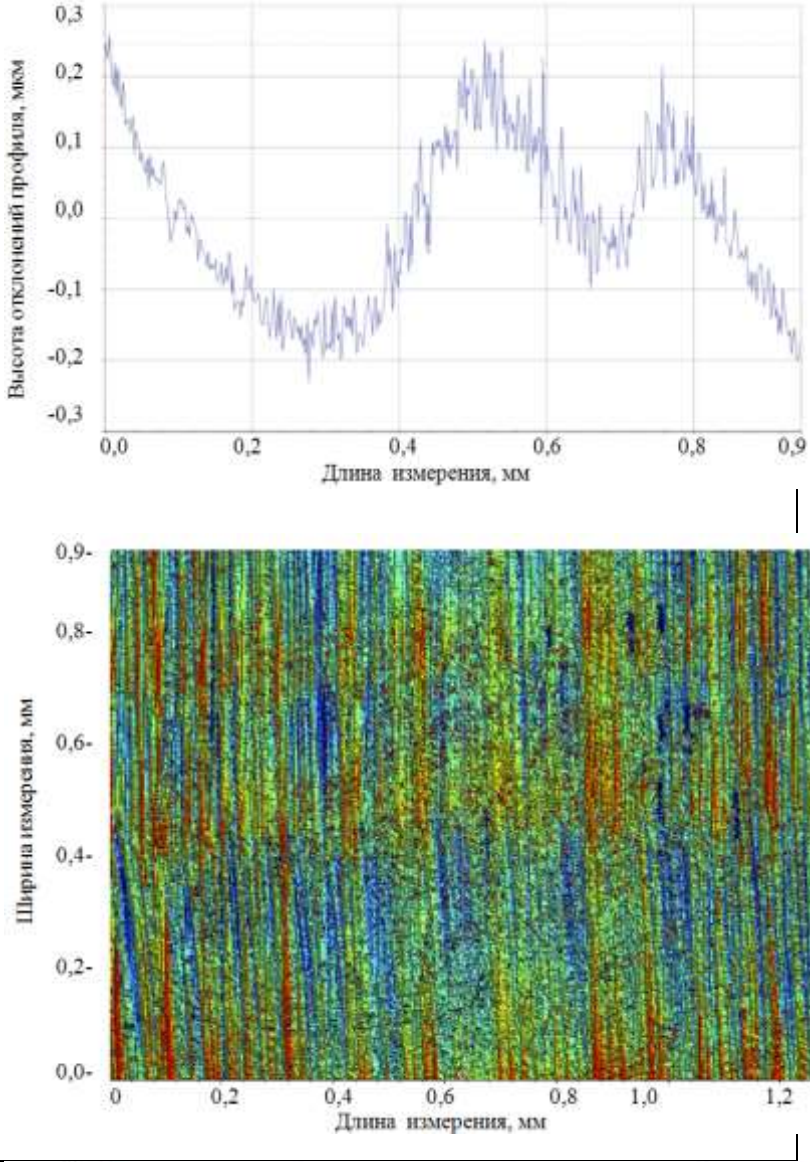
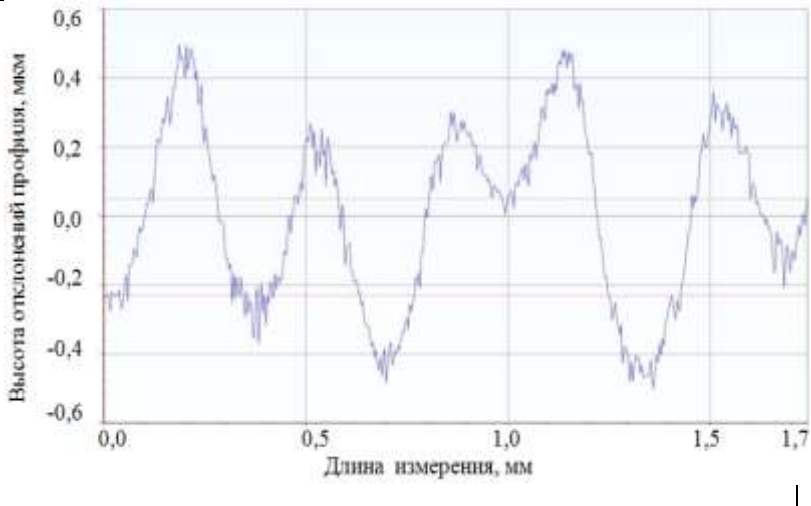
ПРИЛОЖЕНИЕ В

П.3. Результаты измерений «огранки» при ортогональном фрезоточении

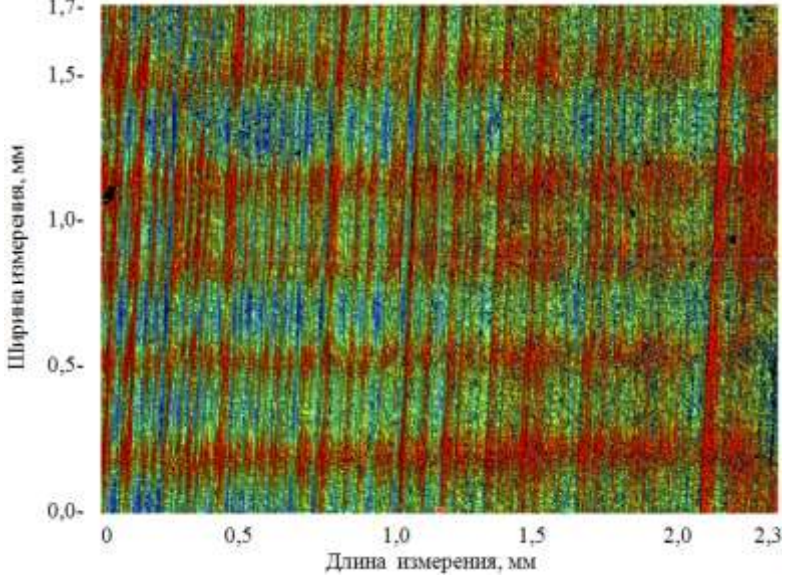
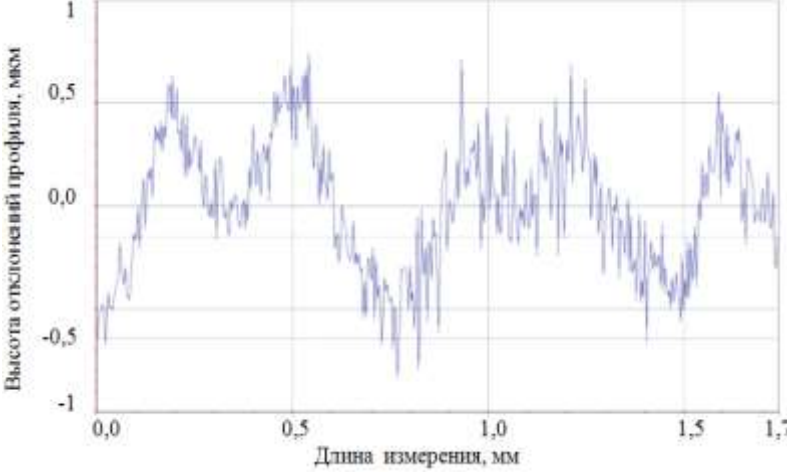
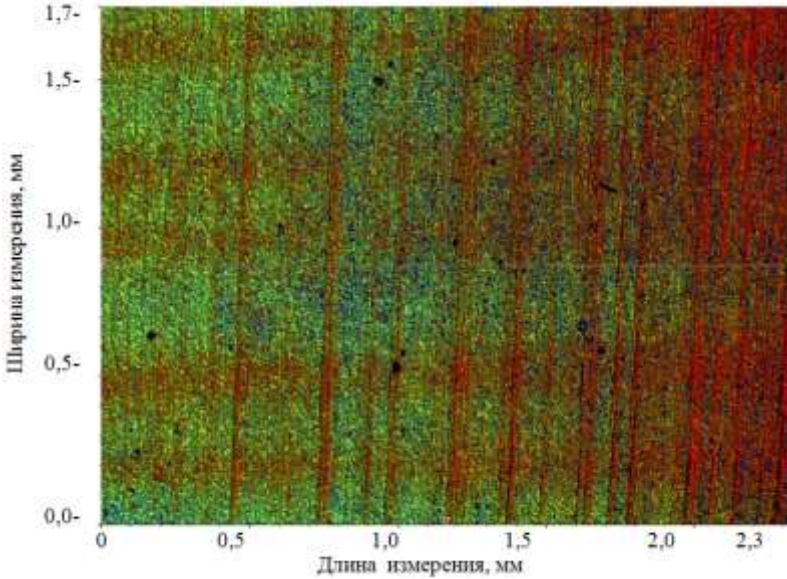
Таблица П.3.1. Результаты анализа «огранки» при ортогональном фрезоточении заготовки из сплава Р6М5К5-МП

Режимы резания	Результаты измерений, e_{max} , МКМ	График микрогеометрии поверхности / Топография поверхности
$S_z = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{oc} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	2	 <p>The figure consists of two vertically stacked plots. The top plot is a line graph showing the profile height (Высота отклонений профиля, мкм) on the y-axis (ranging from -0.6 to 0.8) against the measurement length (Длина измерения, мм) on the x-axis (ranging from 0.0 to 1.0). The curve shows a noisy profile with a significant dip around 0.25 mm. The bottom plot is a color-coded topography map (Топография поверхности) showing the surface texture. The y-axis is labeled 'Ширина измерения, мм' (ranging from 0.0 to 0.9) and the x-axis is 'Длина измерения, мм' (ranging from 0 to 1.2). The map displays a complex surface texture with various colors representing different heights, with a prominent vertical feature on the right side.</p>

Продолжение таблицы П.3.1

$S_z = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 1 \text{ мм};$ $t = 6 \text{ мм};$ $v = 160 \text{ м/мин}$	1,9	
$S_z = 0,1 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 2 \text{ мм};$ $t = 4 \text{ мм};$ $v = 140 \text{ м/мин}$	1,5	

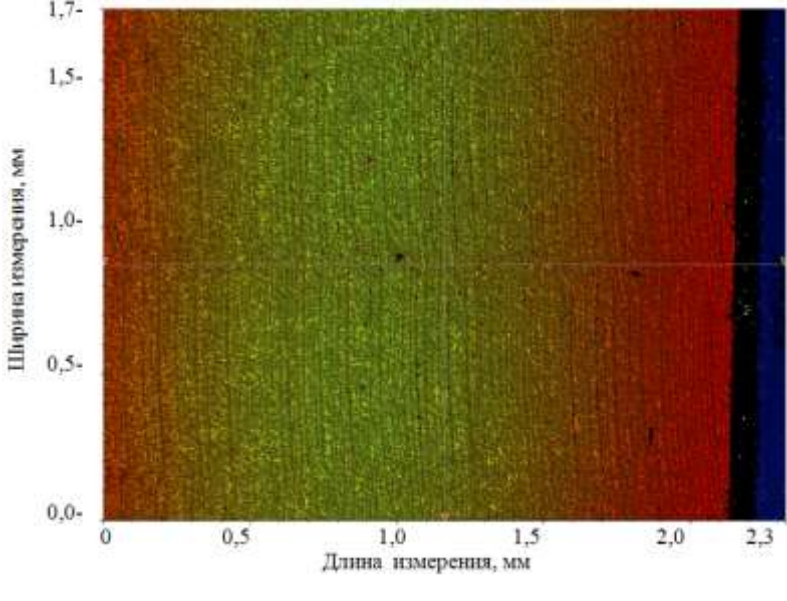
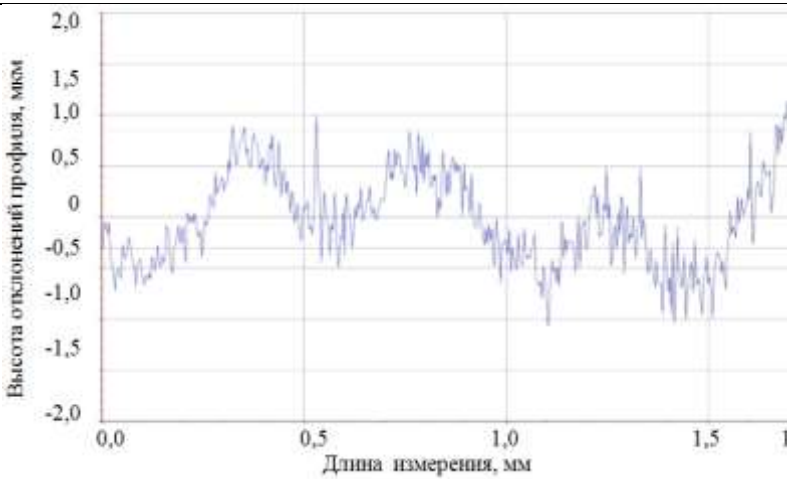
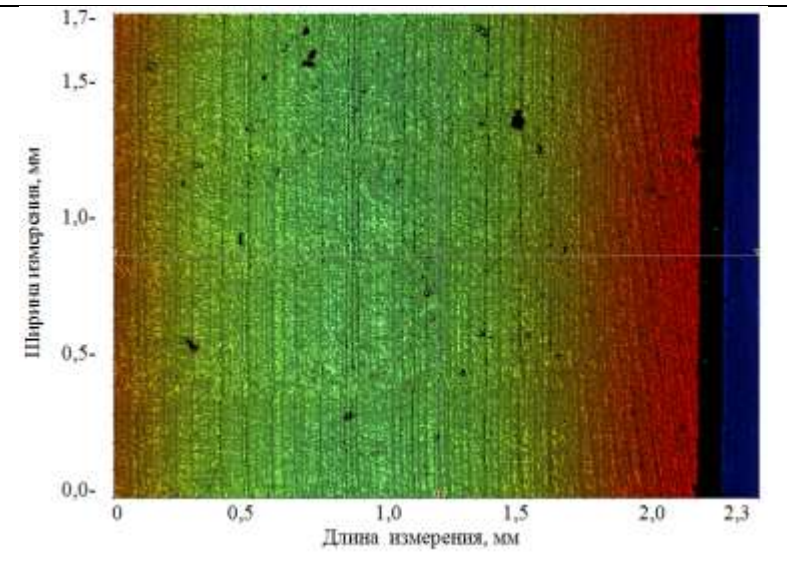
Продолжение таблицы П.3.1

		
$S_z = 0,09 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 1 \text{ мм};$ $t = 4 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	0,9	 

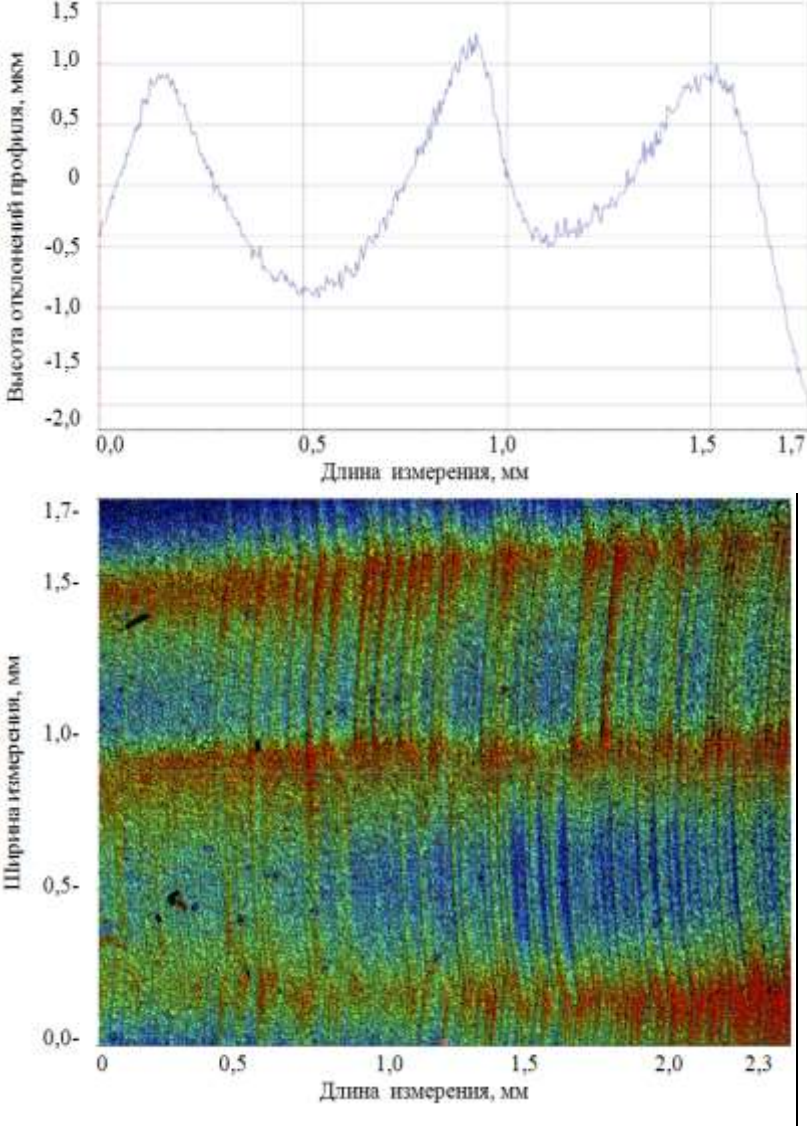
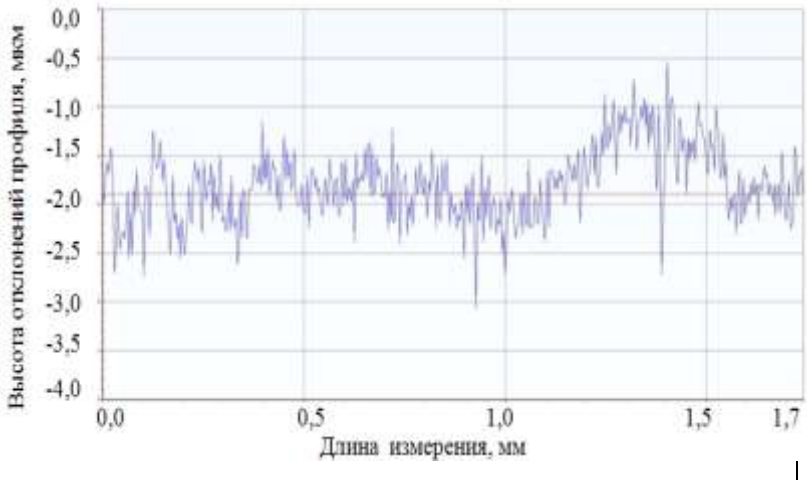
Продолжение таблицы П.3.1

$S_z = 0,09 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 2 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 160 \text{ м/мин}$	1	
$S_z = 0,09 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 6 \text{ мм};$ $v = 140 \text{ м/мин}$	1,6	

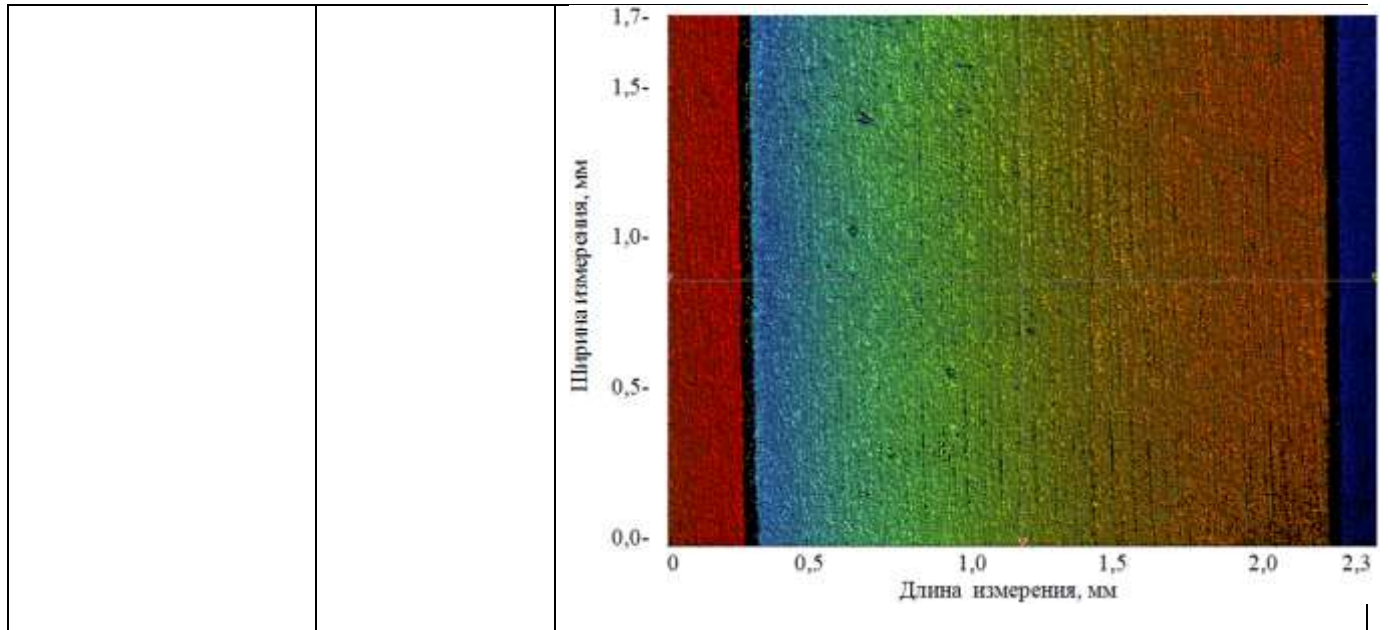
Продолжение таблицы П.3.1

		
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{oc}} = 2 \text{ мм};$ $t = 6 \text{ мм};$ $v = 180 \text{ м/мин}$	0,8	 

Продолжение таблицы П.3.1

$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 1,5 \text{ мм};$ $t = 4 \text{ мм};$ $v = 160 \text{ м/мин}$	0,8	 <p>The top plot shows the profile of height deviation (mm) versus length (mm). The y-axis ranges from -2.0 to 1.5 mm, and the x-axis ranges from 0.0 to 1.7 mm. The profile exhibits a periodic wave-like pattern with three main peaks.</p> <p>The bottom plot is a 2D color map showing height deviation (mm) versus length (mm) and width (mm). The y-axis ranges from 0.0 to 1.7 mm, and the x-axis ranges from 0 to 2.3 mm. The color map displays vertical bands of color, indicating variations in height deviation across the width of the measurement.</p>
$S_z = 0,08 \frac{\text{мм}}{\text{зуб}};$ $B_{\text{ос}} = 1 \text{ мм};$ $t = 2 \text{ мм};$ $v = 140 \text{ м/мин}$	0,3	 <p>The plot shows the profile of height deviation (mm) versus length (mm). The y-axis ranges from -4.0 to 0.0 mm, and the x-axis ranges from 0.0 to 1.7 mm. The profile is highly irregular and noisy, with values ranging from approximately -4.0 mm to 0.0 mm.</p>

Продолжение таблицы П.3.1



ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023669839

**Программа расчета микрогеометрии поверхности при
ортогональном точении-фрезерованием**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Иркутский национальный исследовательский технический
университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)* (RU)

Авторы: *Николаев Андрей Юрьевич (RU), Матлыгин Георгий
Валерьевич (RU), Савилов Андрей Владиславович (RU)*

Заявка № 2023668394

Дата поступления 06 сентября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3853164ba9f96f83b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акт результатов работы

Копия акта результатов работы

<p>СОГЛАСОВАНО Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»  Коновалов А.М. «29» _____ 20 23 г.</p> 	<p>УТВЕРЖДАЮ Технический директор ИАЗ - филиала ПАО «Научно – производственная корпорация «Иркут»  Сергунов А.В. «30» _____ 15 20 23 г.</p> 
--	--

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Матлыгина Георгия Валерьевича на тему «Технологическое обеспечение качества изготовления осевого инструмента из быстрорежущей стали», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.6 Технология машиностроения, представляют научно-практический интерес в виде:

- информативных результатов аналитических исследований точения-фрезерованием;
- разработанной управляющей программы, позволяющей обрабатывать ортогональным точением-фрезерованием заготовки из быстрорежущей стали цилиндрической формы;
- результатов качества поверхности соответствующих параметрам чистовой обработки достигнутых в ходе проведения опытных работ, а именно шероховатость поверхности Ra1,85 по ГОСТ 2789-79, максимальное значение величины пика огранки составляет 0,002 мм, что соответствует 3 степени точности допуска цилиндричности, круглости профиля продольного сечения по ГОСТ 24643-81.
- технологических рекомендаций по применению ортогонального точения-фрезерованием при изготовлении осевого инструмента из быстрорежущей стали.

Использование результатов диссертационной работы позволит повысить производительность и стабильность технологического процесса механической обработки деталей.

Настоящий акт предназначен для предъявления в ВАК Минобрнауки РФ и не может служить основанием для претензий к ПАО «Корпорация «Иркут».

От ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»

Научный руководитель, к.т.н., доцент

 Савилов А.В.

Аспирант кафедры технологии и
оборудования машиностроительных
производств

 Матлыгин Г.В.

**От ИАЗ – филиала
ПАО «Корпорация «Иркут»**

Главный технолог

 Богданов К.В.

Начальник инструментального цеха

 Перфильев Д.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Заключение ФГБУ РАН

Копия заключения ФГБУ РАН за 2022 год.

Заключение федерального государственного бюджетного учреждения
«Российская академия наук» на результаты научных исследований,
представленные образовательной организацией высшего образования
в рамках выполнения проектов программы стратегического
академического лидерства «Приоритет 2030»

1. Наименование организации-участника программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030»

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ "ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"

2. Год отчетности

2022

3. Итоговые выводы экспертизы на каждый представленный результат:

№ п/п	Результат	Итоговая оценка результата	Вывод
1	Методика расчета многослойных композиционных пластин и оболочек для создания цифровой модели динамических испытаний на скоростной удар	4	По итогам рассмотрения результатов данного научного исследования, работа признана актуальной, перспективной и значимой в области материаловедения для создания многослойных композиционных материалов, а также моделирования процессов ударной нагрузки.
2	Алгоритмическое и программное обеспечение реализации Stau трансформации для ускоренной количественной интерпретации данных БПЛА-электроразведки становлением поля	3	Проект направлен на создание алгоритмического и программного обеспечения для ускоренной количественной интерпретации данных БПЛА - электроразведки становлением поля. Авторы разработали и формализовали набор математических методов и алгоритмов в среде MathLab. Однако, как известно, MathLab - это пакет прикладных программ американской компании MathWorks, которая уже давно покинула российский рынок и аннулировала лицензии российских пользователей. За использование программного продукта враждебной компании общая оценка снижена. Отказаться от использования MathLab можно было бы уже в 2022 году. В будущем авторы должны сделать акцент на импортозамещении.

3	Разработка технологии получения хладостойких материалов методом проволочно-дугового выращивания	5	По итогам рассмотрения результатов данного научного исследования работа признана актуальной, перспективной и значимой в области создания новых материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. В материалах результата указаны данные шести научных статей по тематике исследования.
4	Цифровая технология и оборудование для формообразования и правки крупногабаритных маложестких деталей обшивки и каркаса самолётов раскаткой роликами	4	Решается важная задача самолетостроения, заключающаяся в повышении точности и сокращения времени изготовления крупногабаритных деталей каркаса и обшивки самолетов. Научная составляющая с точки зрения химических наук неочевидна.
5	Технология экологичного геологического бурения в труднодоступных условиях	5	Данная работа представляет собой несомненное научное достижение и позволяет проводить буровые работы без существенного негативного воздействия на окружающую среду даже в условиях развития многолетнемерзлых пород, что принципиально повышает экологичность геологопоисковых работ.
6	Цифровая технология изготовления концевых инструментов из быстрорежущей стали на высокопроизводительном металлорежущем оборудовании	4	Результат является значимым. По итогам рассмотрения результатов данного научного исследования, работа признана актуальной, перспективной и значимой в области создания высокоточного режущего инструмента. Повышение производительности технологии изготовления режущего инструмента повышено на 30% по сравнению с классическим точением.
7	Комплекс программных и аппаратных решений для геологического поиска и разведки с применением БПЛА в условиях сложного рельефа	4	Авторы создали оригинальные комплексы для геологического поиска и разведки с применением БПЛА. Предложены новые программные и аппаратные решения, для получения и обработки геофизической информации, системы навигации и управления БПЛА.

8	Автоматизированная станция для профилирования вертикальных шахтных стволов «ЛИС-1» (лазерная измерительная система)	3	Имеются преимущества разработанной системы перед известными аналогами. Есть свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022663941 от 21.07.2022г. «Программа управления лазерным сканером станции профилирования шахтных стволов» (ЛИС-1).
---	---	---	--

4. **Итоговая средняя оценка представленных научных результатов организации-участника программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» (от 0 до 5 баллов)**

4,0

5. **Итоговая оценка представленных научных результатов (комментарий):**

Результаты выполненных научных работ организации-участника программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030» в целом характеризуются **достаточно высокой** актуальностью научных исследований. В рамках выполнения научных исследований отмечен высокий уровень научного и научно-технического сотрудничества, у полученных результатов имеется потенциал практического применения. Результат **«Технология экологичного геологического бурения в труднодоступных условиях»** высоко оценен экспертами Российской академии наук, отметившими его как **несомненное научное достижение**, позволяющее проводить буровые работы без существенного негативного воздействия на окружающую среду даже в условиях развития многолетнемерзлых пород. Разработанные технология и оборудование имеют долгосрочные перспективы для новых наукоёмких разработок и создания технологий, продуктов и услуг, отвечающих национальным интересам Российской Федерации.

Для остальных результатов необходимо учесть замечания экспертов при последующем представлении результатов за отчетный период.

Настоящим подтверждаю, что при проведении экспертизы исключен конфликт интересов и сохранена конфиденциальность рассматриваемых материалов.

Вице-президент РАН
академик РАН

С.Н. Калмыков