

На правах рукописи



Якубов Чингиз Февзиевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА
И ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЦЕССОВ
ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Севастополь – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ») на кафедре «Автоматизация и технология машиностроения»

Научный консультант:

Покинтелица Николай Иванович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Леонов Сергей Леонидович,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет
им. И.И. Ползунова», профессор
кафедры «Технология машиностроения»

Щенятский Алексей Валерьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Ижевский государственный
технический университет
им. М.Т. Калашникова», профессор
кафедры «Инновационные технологии в
машиностроении»

Янюшкин Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Чувашский государственный
университет имени
И.Н. Ульянова», профессор кафедры
«Технология машиностроения»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

Защита состоится 25 сентября 2026 г. в 11⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.393.01 при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 31, Конференц-зал, ауд.18. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» и на сайте – www.sevsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.393.01 Покинтелице Николаю Ивановичу, E-mail: nipokintelitsa@mail.sevsu.ru, Тел.: 8 (8692) 41-77-41 (доб. 1150)

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, профессор



Н.И. Покинтелица

Актуальность темы исследования. При изготовлении широкого класса деталей машин нужно, с одной стороны, выдерживать заданные требования по качеству получения геометрических размеров, шероховатости и физико-механическому состоянию поверхностного слоя, с другой стороны – повышать производительность их выпуска в связи с требованиями рынка. Ставится задача не только повысить точность изготовления деталей в целом, но и обеспечить стабильность их параметров. Указанная задача является актуальной не только для чистовых методов формообразования, но и для черновой обработки, от качества которой зависит эффективность последующих чистовых операций.

Известными методами получения поверхностей с необходимыми показателями качества являются термофрикционная и вибрационная обработки. Недостатком термофрикционной обработки является неопределенность формы полученных поверхностей и сложность реализации размерной обработки. Вибрационная обработка требует дополнительных приводов и систем регулирования. Целесообразным является сочетание указанных методов.

Для стабилизации показателей качества технологические режимы назначаются, исходя из неблагоприятных условий, например, возобновление режущих свойств изношенного инструмента производится значительно раньше, чем того требует его действительное состояние. При прогнозировании состояния технологической системы (ТС) используются детерминированные модели протекания технологического процесса (ТП), осуществляемые с применением традиционных режимов резания, способов диагностики и управления.

Процессы термофрикционного резания (ТФР) имеют сложную стохастическую природу, что приводит к разбросу показателей качества изделий и не позволяет использовать все возможности рассмотренных методов.

Нестабильность качественных характеристик деталей определяется воздействием в процессе их производства на ТС изменяющихся внешних факторов, часть из которых неизвестна и не контролируется в процессе обработки.

Таким образом, особое значение приобретают специальные методы формообразования деталей, которые обеспечивают улучшение характеристик поверхностного слоя детали при обработке. К ним относятся методы, объединяющие термофрикционную, вибрационную и механическую обработку, с применением систем с обратной связью. С целью повышения эффективности процесса ТФР требуется также совершенствование конструкций режущего инструмента и разработка эффективных способов управления.

Необходимо комплексное решение указанных задач, совокупность которых представляет собой нерешенную до настоящего времени проблему.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальные положения теории обработки заготовок с нагревом освещены в исследованиях: Е.У. Зарубицкого, Т.Г. Насад, В.Н. Подураева, Н.И. Покинтелицы, А.Н. Резникова, Н.В. Талантова и др.

Труды авторов посвящены созданию ТП, обеспечивающих эффективную обработку деталей. В них решаются задачи, направленные на повышение производительности обработки, обеспечения заданных показателей качества. При этом во всех существующих работах в качестве теоретических моделей использованы детерминированные модели или эмпирические зависимости, не учитывающие вероятностную природу процесса ТФР, что существенно снижает область их применения. Реальная ТС изменяется с

течением времени. Применение стационарных моделей не позволяет использовать значительный потенциал метода ТФР. Для устранения указанных недостатков необходимо разработать динамические, вероятностные, нестационарные модели процесса ТФР.

Целью диссертационной работы является: создание технологических основ обеспечения качества и повышения стабильности процессов ТФР стальных заготовок, включающих в себя: разработку новых способов, технологий и инструментов, обеспечивающих повышение эффективности съема припуска и качества обработки заготовок.

Основные задачи исследования. Разработать технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности обработки стальных заготовок на операциях ТФР, включающие в себя:

1. Общую методологию обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительной обработки стальных заготовок на операциях ТФР на основе изучения поведения технологической операции как динамической системы при воздействии на нее изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий.

2. Единую методику расчета высокопроизводительных режимов ТФР на основе изучения закономерностей теплообразования, баланса тепловых потоков и особенностей теплопередачи в системе «инструмент–деталь», динамических колебательных явлений, определения взаимосвязей параметров процессов с показателями качества обработанной поверхности.

3. Инновационные конструкции инструментов для ТФР, позволяющие осуществлять управление процессами теплопередачи и обеспечивать заданные качественные характеристики процесса при максимально возможной его производительности.

4. Методы стабилизации качества изделий при высокопроизводительном ТФР.

5. Проверку полученных технических решений и внедрение результатов теоретических и экспериментальных исследований в промышленность.

Научная новизна работы. На основе системного подхода к исследованию технологических операций, основных положений технологии машиностроения и теории резания материалов в работе получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана и научно обоснована методология обеспечения стабильности качества процесса высокопроизводительного ТФР, построенная на основе изучения взаимосвязей технологической операции как динамической системы, при воздействии на нее изменяющихся входных, управляющих и возмущающих факторов, их динамической диагностики и стабилизации процесса ТФР непосредственно в процессе обработки.

2. Выдвинуто научное положение о возможности обеспечения гарантированного качества изделий на операциях ТФР, подверженных влиянию возмущающих случайных факторов в условиях реализации предельных граничных циклов, при обеспечении непрерывной диагностики состояния ТП и осуществлении динамической стабилизации параметров технологического цикла относительно номинального режима непосредственно в процессе обработки.

3. Впервые обнаружена специфическая особенность процессов тепловыделения при ТФР, заключающаяся в наличии основного источника тепла внутри объема слоя жидкого металла, осуществляющего напорное движение между поверхностью инструмента, обрабатываемой поверхностью заготовки и поверхностью стружки. Установлено, что при ТФР в зоне контакта инструмента и заготовки доминируют рабочие процессы, связанные с течением расплавленного металла. При врезании термофрикционного диска (ТФД) в материал заготовки изменяется толщина расплавленного металла. Она увеличивается по параболическому закону и достигает насыщения за промежуток времени

0,2...0,4 с. При этом толщина расплавленного металла равна толщине срезаемого слоя.

4. Доказано, что дополнительным фактором локализации источников теплообразования в жидком металле является анизотропия параметров теплопроводности в зоне обработки, обусловленная разницей коэффициентов теплопроводности холодного и нагретого металла и конвективным переносом тепла в слое металла, что проявляется в виде существенной разницы главных значений тензора теплопроводности. Основное тепловыделение имеет место внутри объема жидкого слоя металла, где наблюдаются наибольшие значения градиента скорости, а в этом слое имеют место вихревые и отрывные явления.

5. Впервые установлены закономерности течения расплавленного металла в зоне контакта, доказано, что пласт расплавленного металла выполняет защитные функции по типу смазывающего вещества, а в слое расплавленного металла между заготовкой и диском имеют место две области течения: напорная и безнапорная (обратная). Выявлено, что напорная область течения занимает $2/3$ ширины заготовки и находится на выходе инструмента из зоны резания, в ней имеет место ламинарное течение жидкого металла с параболическим профилем скоростей. Установлено, что протяженность безнапорной области составляет $1/3$ ширины обрабатываемой заготовки и характеризуется повышенным давлением, где средняя окружная скорость движения металла значительно меньше окружной скорости инструмента.

6. Разработаны новые конструкции специального инструмента, обеспечивающие целенаправленное термическое воздействие на процесс обработки путем управляемого теплоотвода, необходимые параметры вибраций в динамической системе станка, формирование стружки и предотвращение образования нароста, позволяющие целенаправленно формировать заданное качество обработанной поверхности

7. Впервые установлены взаимосвязи спектральных характеристик колебаний элементов ТС со спектром волнистости обработанной поверхности. Показано, что внешняя поверхность инструмента при колебаниях изменяет толщину слоя металла, вытесняя его на поверхность заготовки. При этом высота выступов будет пропорциональна относительной скорости инструмента.

8. Для количественной оценки адгезионно активных структур на поверхностях ТФД по величине свободной энергии предложено новое научное понятие коэффициента темно-серого оттенка (КТСО), который характеризует распределение плотности микроструктурных объектов по величине свободной энергии.

9. Построен стохастический наблюдатель, который дает возможность получать информацию о состояниях ТП с учетом динамических свойств объекта, непосредственно в процессе обработки в виде следящей системы с фильтром Калмана-Бюсси с минимальной среднеквадратической ошибкой, и позволяет оценивать недоступные измерению параметры состояния процесса ТФР.

10. Разработана САУ ТП операцией ТФР, использующая результаты технологической диагностики и обеспечивающая компенсацию влияния возмущающих факторов на выходные параметры ТП ТФР, что позволило повысить стабильность качества изделий.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Созданы технологические основы обеспечения качества и повышения стабильности обработки стальных заготовок на операциях ТФР.

2. Разработана теория оценки, прогнозирования и управления операцией ТФР, позволяющая осуществлять расчет оптимальных режимов резания, обеспечивающих стабильность показателей качества поверхностного слоя стальных заготовок при

высокопроизводительном ТФР.

3. Разработан алгоритм синтеза стохастических наблюдателей применительно к операции ТФР, который дает возможность получать информацию о состояниях ТП с учетом его стохастической природы непосредственно в процессе обработки в виде следящей системы – фильтра Калмана-Бюсси с минимально достижимой среднеквадратической ошибкой.

4. Построен динамический стохастический регулятор, использующий результаты технологической диагностики, позволяющий учесть и скомпенсировать влияние возмущающих факторов на результирующие выходные параметры ТП.

5. Разработаны методики и практические рекомендации по эффективной реализации в промышленности разработанных методов ТФР.

6. Предложены конструкторско-технологические решения по созданию оснастки, инструмента и схем обработки, обеспечивающие возможность практической реализации ТФР сталей.

7. Разработаны алгоритмы и программы для расчета режимов ТФР, а также показателей качества полученной поверхности. Практическая реализация основных результатов исследования позволяет увеличить производительность при обработке плоскостей в 1,3...1,5 раза и получить износостойкие поверхности.

Объектом исследования являются ТС станка с дисковым инструментом, предназначенным для обработки заготовок, и динамическими приспособлениями, а также операции и процессы ТФР.

Предметом исследования являются рабочие процессы и параметры ТФР при учете целенаправленного воздействия на процессы теплопередачи и параметры колебаний в ТС станка, а также закономерности формирования параметров качества при обработке стальных заготовок.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены путем математического моделирования рабочих процессов обработки, в частности, процессов теплопередачи и динамических колебательных процессов в ТС, возникающих вследствие действия случайных факторов. Процессы теплопередачи исследованы при учете анизотропии теплофизических свойств системы вследствие неравномерного нагрева и фазовых изменений. Для исследования формы обработанной поверхности использована теория случайных процессов, методы спектрального анализа и элементы корреляционного анализа случайных величин и случайных процессов. Экспериментальные исследования проведены по специальной методике с использованием разработанных приспособлений и оснастки. Полученные данные обработаны с помощью разработанных алгоритмов и программ, современных информационных технологий, учитывающих погрешности экспериментальных измерений и особенности проведения исследований.

Личный вклад соискателя. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, выносимые на защиту, получены автором самостоятельно.

Личный вклад соискателя заключается в обосновании научного направления, формулировании цели работы; обосновании и разработке методик экспериментальных исследований, формулировании новизны и основных выводов по результатам работы, а также в анализе и обобщении полученных результатов исследования.

Автором теоретически и экспериментально исследованы особенности рабочих процессов ТФР в работах [7, 10-13, 15-19, 22]; установлены закономерности теплообразования и разработаны математические модели процессов теплопередачи в работах

[1, 4, 8, 9, 14, 23]; исследованы динамические колебательные процессы, осуществляемые с применением специальных устройств в работах [5, 20]; исследованы показатели качества обработанной поверхности и установлена их связь с параметрами процесса обработки в работах [2, 6, 21]; разработаны и исследованы эффективные конструкции инструментов в работах [3, 24-25]; разработаны методы и даны рекомендации по повышению эффективности процессов ТФР в работе [6].

Положения, выносимые на защиту:

1. Методология обеспечения качества и повышения стабильности высокопроизводительной обработки стальных заготовок на операциях ТФР на основе изучения поведения технологической операции как динамической системы при воздействии на нее изменяющихся входных, управляющих и возмущающих воздействий.

2. Научное положение о возможности обеспечения гарантированного качества изделий на операциях ТФР, подверженных влиянию возмущающих случайных факторов в условиях реализации предельных граничных циклов.

3. Теоретические и экспериментальные результаты исследования процессов теплообразования, баланс тепловых потоков и особенностей теплопередачи в системе «инструмент–деталь» при ТФР, в том числе при целенаправленных изменениях тепловых потоков в системе, и разработанные математические модели процессов теплопередачи.

4. Положение о специфической особенности процессов тепловыделения при ТФР, заключающееся в наличии дополнительного источника тепла в зоне контакта внутри объема слоя жидкого металла.

5. Эффект анизотропии направлений теплопроводности материала заготовки, обусловленный разностью коэффициентов теплопроводности холодного и нагретого металла.

6. Методика расчета высокопроизводительных режимов ТФР.

7. Инновационные конструкции инструментов для ТФР, повышающие качественные характеристики процесса и его производительность.

8. Методы стабилизации качества изделий при высокопроизводительном ТФР.

9. Положение о возможности получения рабочей информации о состояниях ТП ТФР с учетом его стохастической природы непосредственно в процессе обработки в виде следящей системы с фильтром Калмана – Бюсси.

10. Положение о повышении стабильности и обеспечении качества изделий на операциях ТФР при работе в условиях предельных граничных циклов, за счет синтеза детерминированного регулятора со стохастическим наблюдателем Льюинбергера.

Научная специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа представляет собой новое решение актуальной научно-технической проблемы – создание технологических основ обеспечения качества и повышения стабильности обработки стальных заготовок на операциях ТФР. Работа соответствует паспорту научной специальности: 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Области исследования: № 2 (теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий), № 3 (исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности

и экономичности обработки), № 5 (создание оборудования и инструментов для новых технологических процессов механической и физико-технической обработки), № 6 (исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования), № 7 (новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации).

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей, обоснованностью принятых допущений, использованием математически корректных методов. Адекватность полученных результатов подтверждена экспериментальной проверкой и результатами внедрения в производство.

Материалы диссертационной работы внедрены в производство на ООО «Донбасс-Сервис» (г. Луганск), с годовым экономическим эффектом от внедрения 1885000 руб., на ООО «Локомотив Сервис Ростов» (г. Донецк, Ростовская область) с годовым экономическим эффектом от внедрения 2440000 руб. на АО «Керченский металлургический завод» (г. Керчь) с годовым экономическим эффектом от внедрения 4758900 руб., на ООО «ПК ТпЮГ» (г. Симферополь) с годовым экономическим эффектом от внедрения 3595420 руб.

Основные положения диссертации получили полное отражение в докладах на следующих конференциях и семинарах: 3-й Международный научный симпозиум «Перспективные технологии аэрокосмической техники», Севастополь, 2021 г.; Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования», Севастополь, 2023 г.; 15-я Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении» в рамках конгресса «Русский инженер» МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, 2023 г.; Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития науки и образования в условиях формирования технологического суверенитета», г. Ростов-на-Дону, 2024 г.; Международная научно-практическая конференция «Современные технологии: опыт внедрения, новые тренды и перспективы развития», г. Ялта, 2024 г.; XVI Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии машиностроения, авиации и транспорта», г. Ростов-на-Дону, п. Дивноморское, 2024, г.; XVI Международная научно-техническая конференция «Машиностроительные технологические системы», г. Ростов-на-Дону, 2025 г.; XXVII Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров», г. Алушта, 2025 г.; II Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», г. Комсомольск на Амуре, 2017 г.; Национальная научно-практическая конференция «Реновация машин и оборудования», г. Уфа, 2020 г.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 35 работах, из которых 19 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 3 – в изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus. Получено 12 патентов РФ – 1 на изобретение и 11 – на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы, содержащего 235 наименований, приложений. Диссертация содержит 215 рисунков, 21 таблицу в тексте. Общий объем работы – 522 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы. Сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна работы, приведены положения, выносимые на защиту, изложены методология и методы исследования, а также представлена информация о степени достоверности и апробации результатов диссертации.

В первой главе выполнен анализ результатов статистических данных по обработке материалов резанием, дана оценка трудоёмкости технологических операций, отмечено, что 67% затрат приходится на черновую обработку. Среди операций черновой обработки наибольшее распространение получили процессы фрезерования, строгания, обдирочного шлифования. Значительные проблемы возникают при обработке стальных заготовок, полученных методами литья,ковки,штамповки, связанные с износом инструмента, недостаточной производительностью, высокими энергосиловыми затратами и нестабильностью показателей качества обработанной поверхности, появлением большого количества бракованных изделий, увеличением затрат на закупку инструмента вследствие интенсификации его износа. Санкционные условия, поток дешёвой продукции из Китая вынуждают предприятия осуществлять поиск новых, более эффективных в сравнении с традиционными методами способов обработки материалов, чтобы выжить в конкурентной борьбе. В работе показано, что одним из наиболее реальных путей решения указанной проблемы является поиск наиболее прогрессивных методов обработки. К таким методам относится процесс ТФР. Анализ работ, посвященных исследованиям процесса резания металлов, показал, что исследования процессов ТФР металлов ТФД, а также большинство связанных с ними вопросов являются актуальными и требуют дополнительной теоретической проработки и экспериментальной проверки. При ТФР в зависимости от жесткости оборудования скоростью резания соизмерима со скоростью процессов торцевого шлифования (35...80 м/с). Вследствие работы сил трения в зоне контакта инструмента с заготовкой выделяется значительное количество теплоты, которая на стадии врезания способствует снижению твердости срезаемого слоя, а на стадии установившегося процесса материал заготовки находится в расплавленном состоянии, при этом часть металла испаряется, переходя в газообразное состояние, часть материала удаляется из зоны контакта вращающимся инструментом.

Для повышения стабильности процессов ТФР стальных заготовок необходимо проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований, включающих в себя разработку новых способов, технологий и инструментов с целью повышения эффективности съема припуска и качества обработки заготовок.

На основе анализа существующей информации сформировано основное направление диссертационной работы, поставлена цель и сформулированы и задачи исследования.

Во второй главе изложена методология – повышения стабильности процессов ТФР сталей. Операция рассмотрена как динамическая система, изменяющая свои свойства с течением времени. С целью упрощения процедуры моделирования объекта осуществлена ее декомпозиция на подсистемы «Процесс резания» и «Технологическая система». В ходе системного анализа установлено, что решение проблемы создания технологических основ обеспечения качества и повышения стабильности процессов ТФР стальных заготовок требует разработки новых способов, технологий, инструментов и приспособлений, а также применения методов оптимальной стохастической

диагностики и управления. Методами системного анализа было установлено, что основными причинами разброса показателей качества при ТФР является нестационарность геометрической формы ТФД, его дисбаланс, неравномерность припуска на обработку и колебания фактической глубины резания. Значения вышеуказанных параметров недоступны прямому измерению во время обработки. Для эффективного управления операцией ТФР необходима адекватная рабочая информация о состоянии ТС. Такая информация может быть получена путем применения подхода, основанного на синтезе автоматических систем управления со «стохастическим наблюдателем» в форме фильтра Калмана–Бюсси, впервые реализованного в работах С.М. Братана (рисунок 1). Однако, непосредственное применение полученных им моделей невозможно вследствие наличия погрешностей, вызванных многократным дифференцированием сигналов. Для устранения вышеуказанной проблемы целесообразна разработка нового алгоритма управления, исключающего необходимость процедуры дифференцирования сигналов.

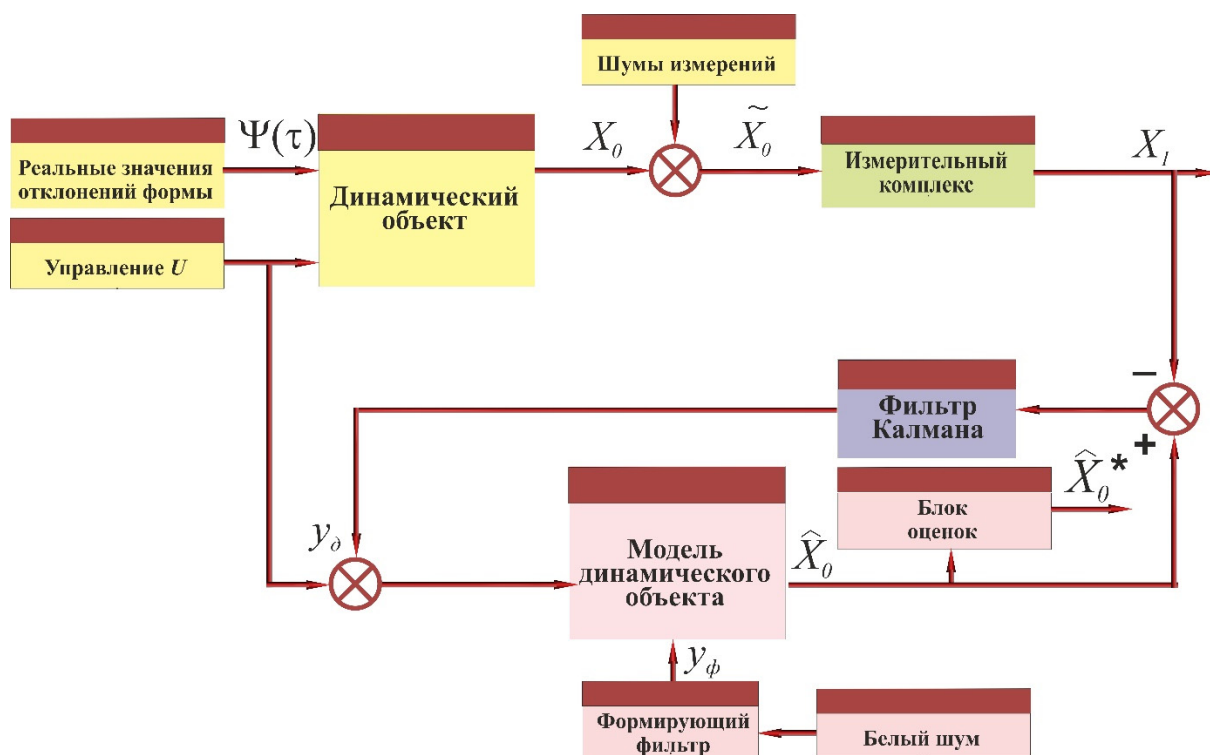


Рисунок 1 – Структура динамического наблюдателя для процесса ТФР

В этом случае может быть построен оптимальный регулятор в виде следящей системы с фильтром Калмана–Бюсси, обеспечивающий стабильность работы объекта по расчётным граничным циклам. Для этого необходимо разработать математические модели процесса ТФР, позволяющие осуществить расчет граничных циклов, учитывающих изменение фазовых координат объекта с течением времени. На основе математических моделей операции ТФР требуется создание методики, позволяющей осуществлять расчёт высокопроизводительных циклов программного управления технологической операцией. Анализ процессов, возникающих в зоне контакта инструмента и заготовки, позволил систематизировать основные способы обработки и предложить направления реализации различных методов ТФР (рисунок 2).

Разработаны специальные приспособления (вибрационный стол) и инструмент, обеспечивающие необходимые параметры вибраций в динамической системе станка путем использования специальных демпферов, средств формирования стружки и предотвращения образования нароста.



Рисунок 2 – Методы ТФР, позволяющие повысить эффективность обработки

Для стабилизации термического режима рекомендуется усовершенствовать конструкции ТФД, разработать инструмент с охлаждением, обеспечивающим эффективный отвод тепла из зоны резания.

В третьей главе дано описание плоскости сдвига при ТФР как диссипативной структуры в синергетике процесса стружкообразования, рассмотрены деформационные процессы стружкообразования, проведены исследования изменения механических состояний материала. Исследование явлений, возникающих при ТФР сталей, позволило высказать предположение об формировании полей напряжений с повышенными деформационными характеристиками. На стадии врезания модуль пластичности может быть вычислен как:

$$\frac{grad(\gamma)}{grad(\tau)} = -\frac{\tau_{ynp}(\gamma)}{gG}, \quad (1)$$

где $grad(\gamma)$, $grad(\gamma)$ – градиенты напряжений и деформаций соответственно; τ_{ynp} – предел упругости, МПа; g – потенциал пластической деформации, Мдж/м; G – модуль упругости, МПа.

На рисунках 3, 4 приведены поля напряжений при ТФР коррозионностойкой стали и конструкционной стали повышенной обрабатываемости, полученные путем математического моделирования.

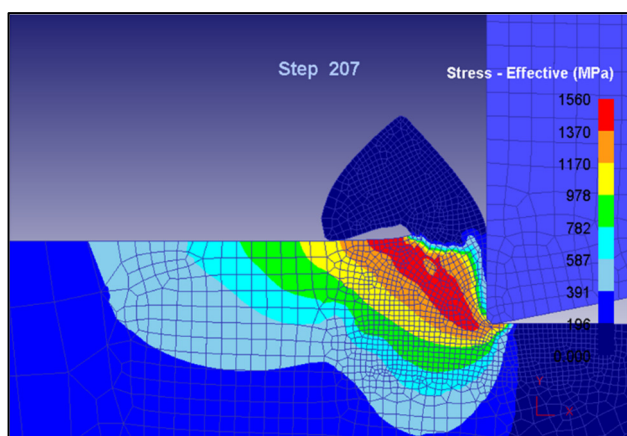


Рисунок 3 – Поля интенсивностей напряжений при ТФР коррозионностойкой стали

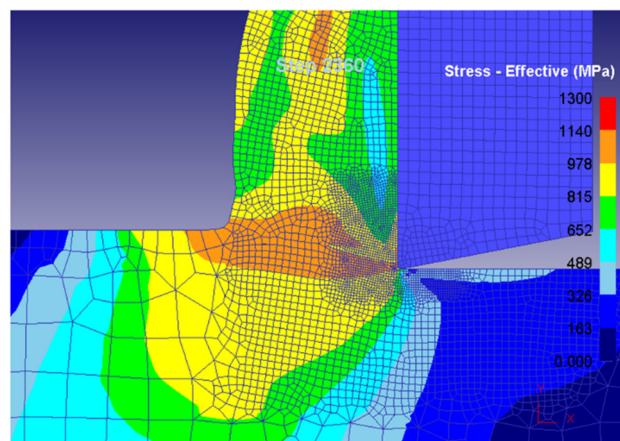


Рисунок 4 – Поля интенсивностей напряжений при ТФР конструкционной стали

При ТФР коррозионностойкой стали образуются более высокие напряжения, но уменьшается объем их распространения. Зона сдвига при ТФР коррозионностойкой стали более узкая, чем у конструкционной стали. Высокие градиенты напряжений в срезаемом слое при ТФР коррозионностойкой стали определяют большую кривизну сходящей стружки и меньшую площадь контакта стружки с передней поверхностью ТФД по сравнению с резанием конструкционной стали.

На основании изложенного сформулирован критерий самоорганизации стружкообразования, обеспечивающий минимальную мощность резания:

$$N = v \cdot \cos \theta \cdot \int_0^F \tau \cdot dF \rightarrow \min, \quad (2)$$

где v – скорость резания $м/с$; θ – угол сдвига, рад; τ – касательные напряжения в плоскости сдвига, $МПа$; F – площадь плоскости сдвига, $м^2$.

В главе приведены результаты определения характерных силовых и эксплуатационных параметров ТФР. Использованы экспериментальные методы исследований на специальной установке с трехкомпонентным динамометром. Исследования проведены для типовых инструментов в виде гладких дисков с диаметрами $\varnothing 160 - 500$ мм, изготовленными из сталей 45 и 50, и диска с небольшими впадинами на рабочей поверхности.

Получены зависимости расхода мощности от величины окружной скорости вращения ТФД в пределах номинальной мощности главного электродвигателя (рисунок 5) и от величины припуска ((рисунок 6) (1 – сталь 45; 2 – сталь 12Х18Н12Т; 3 – сталь 12Х13; 4 – сталь 38ХГН; 5 – сталь 09Х15Н8Ю)).

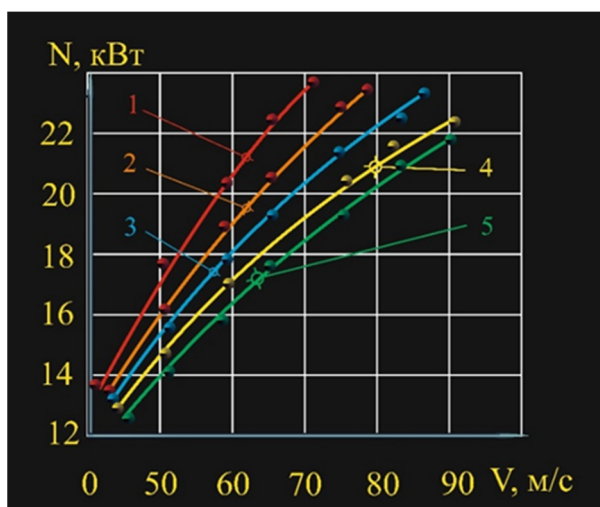


Рисунок 5 – Зависимость мощности привода шпинделя от окружной скорости ТФД

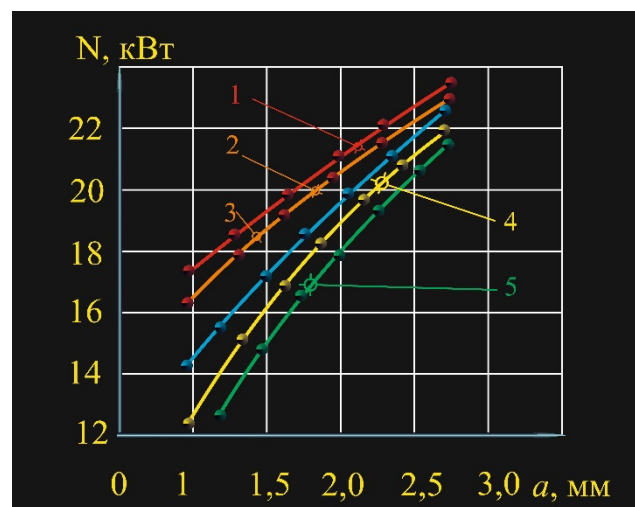


Рисунок 6 – Зависимость мощности привода шпинделя от величины припуска

Силовые факторы определены для обработки деталей с использованием динамических приспособлений и различных видов динамического и термического воздействия на процесс обработки (рисунки 7, 8, 9).

Для описания силовых факторов применена степенная математическая модель проекций силы резания. Методом планирования эксперимента определены коэффициенты математической модели для различных схем, различного инструмента и обрабатываемых материалов. Характерная математическая модель проекций сил резания для заготовки из стали 45 имеет вид:

$$P_z = \frac{114,23 \cdot V_3^{0,69} \cdot F^{1,25}}{V_\delta^{0,57} \cdot \lambda^{1,21}}; P_y = \frac{71,17 \cdot V_3^{0,82} \cdot F^{0,97}}{V_\delta^{0,65} \cdot \lambda^{0,92}}; P_x = \frac{11,92 \cdot V_3^{0,75} \cdot F^{1,15}}{V_\delta^{0,65} \cdot \lambda^{0,93}}, \quad (3)$$

где V_3 – скорость подачи, мм/мин; V_δ – скорость резания, м/с; λ – коэффициент теплопроводности материала заготовки, Вт/(м·К); F – площадь срезаемого слоя, мм².

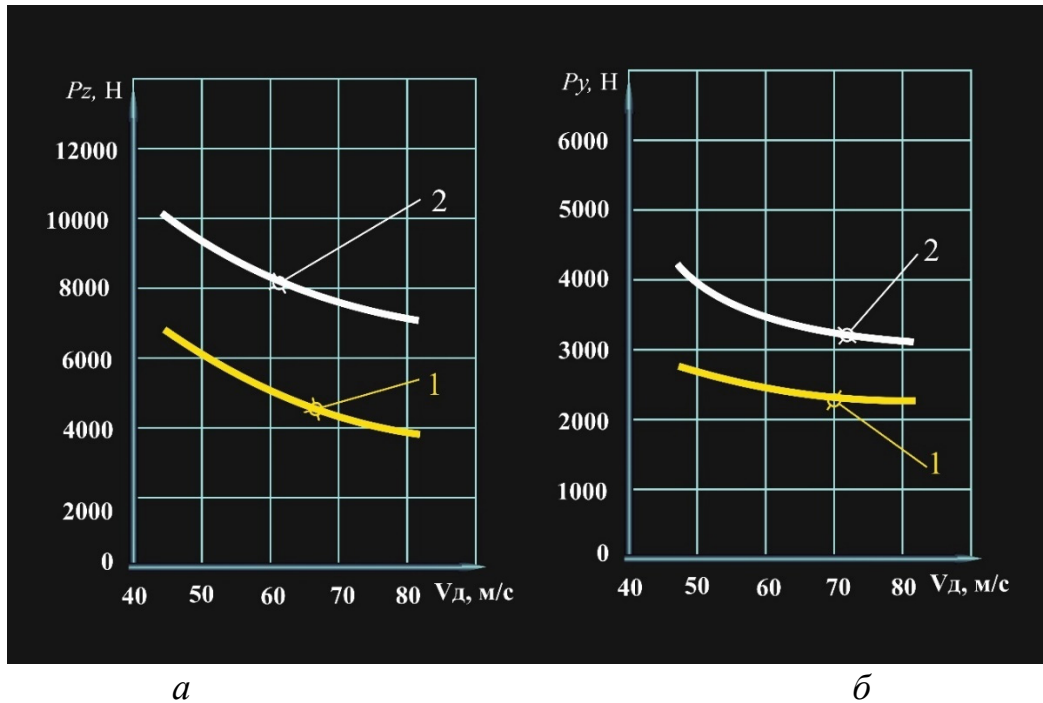


Рисунок 7 – Снижение составляющих силы резания: а – тангенциальной; б – радиальной при применении демпфера колебаний инструмента (1 – сталь 45; 2 – сталь 09X15H8Ю)

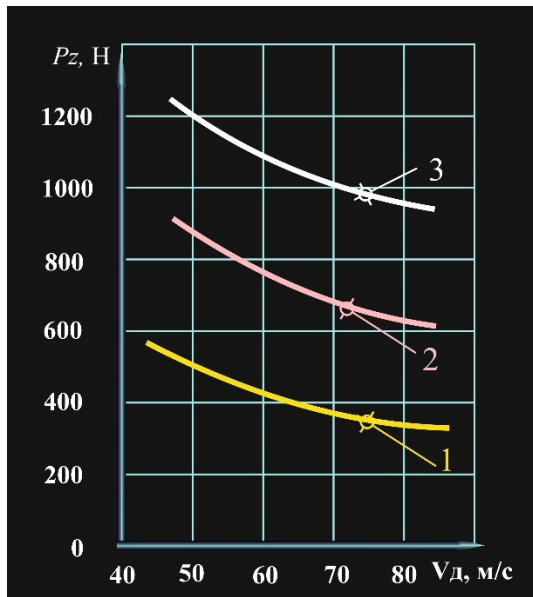


Рисунок 8 – Изменение тангенциальной составляющей силы резания P_z при нагреве заготовки

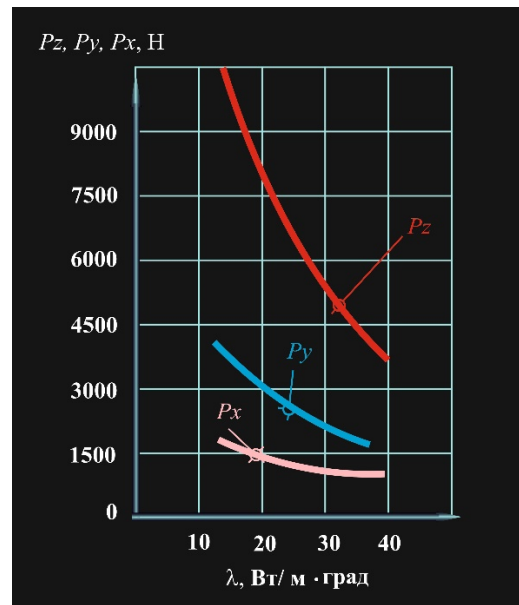


Рисунок 9 – График зависимости силы резания от коэффициента теплопроводности обрабатываемого материала ($F=270$ мм²; $V_3=100$ мм/мин; $V_\delta=52,4$ м/с)

Проведено исследование износа инструмента. Установлены закономерности изменения формы режущей кромки ТФД. Для этого использованы отпечатки его формы при вдавливании в медную пластину. На основе замеров обоснована схема изменения формы режущей кромки. Изменения радиуса режущей кромки в пределах 0,2...0,5 мм происходят за 6...24 ч работы в зависимости от материала ТФД. Данный период времени определяет среднюю стойкость инструмента.

В четвертой главе приведены результаты исследований рабочих процессов ТФР, связанных с течением расплавленного металла. Выделены три стадии процесса обработки: врезание инструмента, установившейся процесс резания, а также выход инструмента.

Установлены закономерности теплового баланса процесса и его связь с механизмом стружкообразования на каждой стадии процесса. Определены закономерности тепло-массообмена в зоне обработки. Для этого использованы методы математического моделирования. На основе разработанной математической модели установлены энергетические и динамические параметры процесса.

В частности, работа сил резания на стадии врезания определена в виде параболической функции времени:

$$A = V_{\tau} k_c C_{\partial} (V_s t - a_s \frac{t^2}{2}), \quad (4)$$

где V_{τ} – окружная скорость инструмента, м/с; V_s – скорость подачи, м/с; C_{∂} – жесткость упругой системы шпиндель-заготовка, Н/м; t – время, с; k_c , a_s – константы.

Составлено уравнение теплового баланса при врезании, откуда найдено, что начальная стадия обработки заканчивается в момент времени $t_m = (0,2...0,4)$ с, который вычисляется по формуле:

$$t_m = \frac{2}{a_s} \left[\frac{a_m (C_w (\Theta_{\Pi} - \Theta_o) + C_{\Pi} k_p) k_w \cdot b}{k_1 E_M V_{\tau} k_c C_{\partial}} - V_s \right], \quad (5)$$

где a_m – толщина срезаемого слоя, м; C_w , C_{Π} – теплоемкость материала заготовки и инструмента соответственно, Дж/(кг·°C); b – ширина заготовки, м; E_M – механический эквивалент теплоты, Дж/кал; Θ_o – температура окружающей среды, °C; Θ_{Π} – температура плавления металла, °C; k_c , k_p , k_1 , k_w – коэффициенты.

Установлено, что на стадии установившегося процесса ТФР в зоне контакта инструмента с заготовкой генерируется слой расплавленного металла, толщина которого численно равна величине срезаемого припуска a_m . Обоснована физическая модель процесса обработки, учитывающая наличие слоя расплавленного металла (рисунок 10 а, б).

На основе анализа физической картины течения разработана динамическая модель для расчета параметров течения. Модель базируется на уравнении неразрывности посредством баланса расхода жидкого металла. Уравнение неразрывности представлено в виде:

$$Q_{\Pi} = Q_C + Q_D + Q_{H1} + Q_{H2} + Q_{\tau} + Q_{CG}, \quad (6)$$

где Q_{Π} – расход жидкого металла, м³/с; Q_C – расход металла, идущего на формирование части стружки, м³/с; Q_D – расход металла на формирование обработанной поверхности, м³/с; Q_{H1} , Q_{H2} – расход металла для формирования наплывов на боковых поверхностях детали, м³/с; Q_{τ} – расход металла, удаленного из зоны контакта инструментом, м³/с; Q_{CG} – расход металла вследствие сгорания, образования капель и окисления, м³/с.

Для конкретной марки стали ($\lambda = const$) зависимость (8) примет вид:

$$\rho c \frac{\partial \Theta}{\partial t} + v_x \frac{\partial \Theta}{\partial x} + v_y \frac{\partial \Theta}{\partial y} + v_z \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) + N_{\text{дис}}. \quad (10)$$

При исследовании механизмов течения жидкого металла при взаимодействии ТФД и заготовки обнаружены области безнапорного (T_1) и напорного (T_2) течения жидкости.

В безнапорной области течение металла подчиняется прямолинейному закону (рисунок 12 а, б).

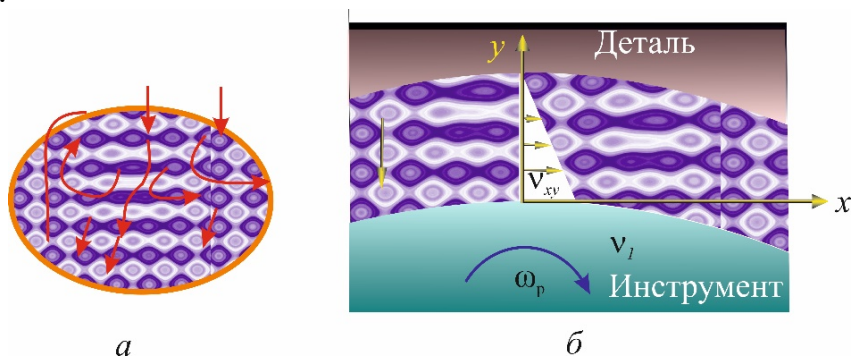


Рисунок 12 – Безнапорное движение жидкости в зоне контакта:
а – в поперечном, б – в продольном сечениях

В этой зоне в связи с практическим отсутствием внутреннего трения, повышение температуры моделируется параболой второго порядка. В напорной области течение металла описывается параболой второго порядка, а повышение температуры параболой четвертого порядка. (рисунок 13 а, б).

Доказано, что основное повышение температуры имеет в середине слоя расплавленного металла, где имеют место максимальные градиенты скорости. Это имеет место как на участке напорного, так и на участке безнапорного движения расплавленного металла.

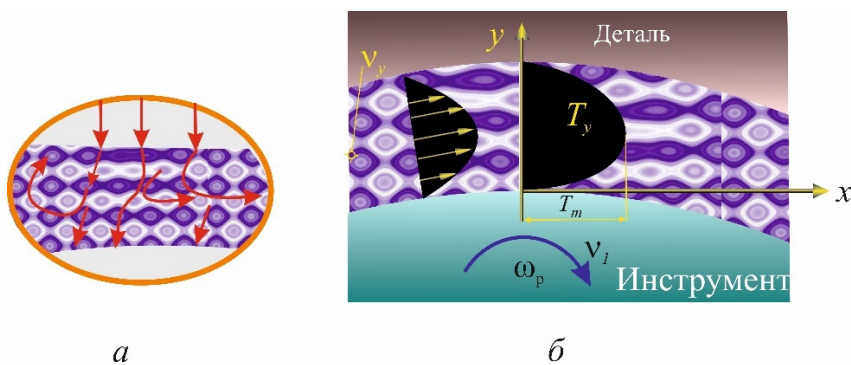


Рисунок 13 – Напорное движение жидкости в зоне контакта:
а – в поперечном, б – в продольном сечениях

Установлены закономерности пространственного течения металла и влияние сужения слоя металла, которое имеет место вследствие относительного движения инструмента и заготовки, на тепловыделение. В результате анализа процесса ТФР методами покадровой скоростной кинофотосъемки определены границы зоны, заполненной расплавленным металлом. Длина зоны составляет $180...240^\circ$ по периферии инструмента (рисунки 14, 15). Установлено, что под действием центробежных сил происходит отрыв капель жидкого металла с поверхности инструмента, в зоне контакта возникает обратное течение.

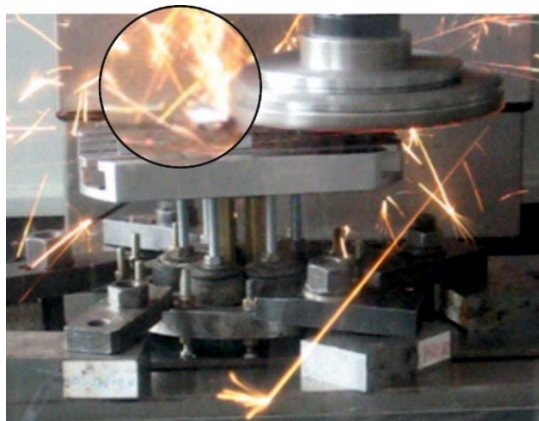


Рисунок. 14 – Срыв капель жидкого металла из периферийной части

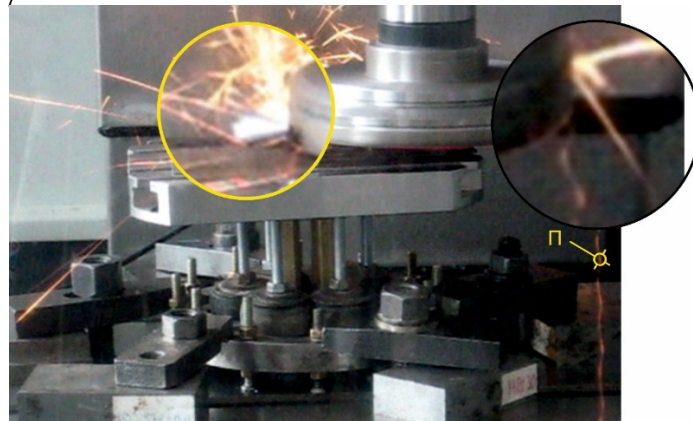


Рисунок 15 – Кадр видеосъемки, на котором прослеживается поток металла П с волнообразным движением

При наложении дополнительных вибраций на ТС наблюдается повышение интенсивности отрыва металла от заготовки вследствие действия центробежных сил в жидком металле возникают спиралевидные вихревые течения (рисунки 16, 17).

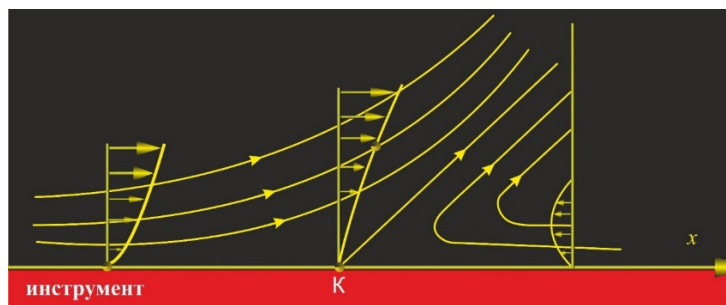


Рисунок 16 – Схема траектории слоев жидкого металла при ТФР

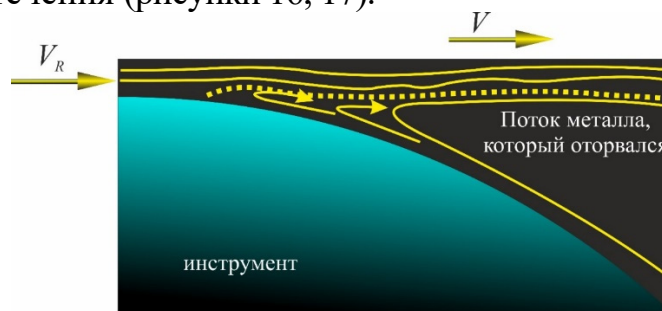


Рисунок 17 – Образование потока жидкого металла, удаляемого из зоны контакта

В зоне контакта генерируется стойкая вихревая пелена (рисунок 18) в области чисел:

$$40 < Ta < 400, \quad (11)$$

где Ta – число Тейлора, которое в безразмерном виде рассчитывается по формуле:

$$Ta = \frac{U \cdot \Delta}{\nu} \sqrt{\frac{\Delta}{R}}, \quad (12)$$

где Δ – толщина зоны контакта, м; U – окружная скорость ТФД, м/с; R – радиус ТФД, м; ν – кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Установлено, что ламинарный поток жидкого металла соответствует $Ta < 40$, турбулентный $Ta > 400$. При ТФР наблюдается спиралевидное движение расплавленного, которое может быть смоделировано путем использования волновой теории капли (рисунок 18). В слое расплавленного материала заготовки толщиной δ образуется вихревая пелена. Наличие вихрей обуславливает спиралевидное движение жидкого металла на поверхности инструмента вне зоны резания (рисунок 19).

Исследованы закономерности формирования волнистой поверхности детали, установлено, что при ТФР рельеф обработанной поверхности формируется при периодических изменениях толщины слоя металла вследствие колебаний инструмента и заготовки. Показано, что жидкий металл вытесняется, проходя в зазор между кромкой инструмента и заготовки. Застывая, жидкий металл образует микропрофиль обработанной поверхности. При увеличении подачи жидкого металла соответственно увеличивается высота микропрофиля.

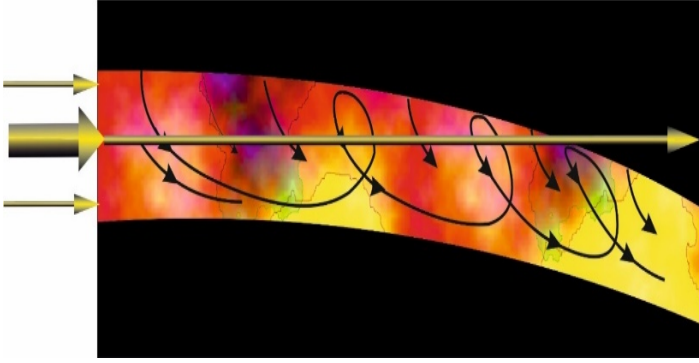


Рисунок 18 – Схема спиралевидного движения

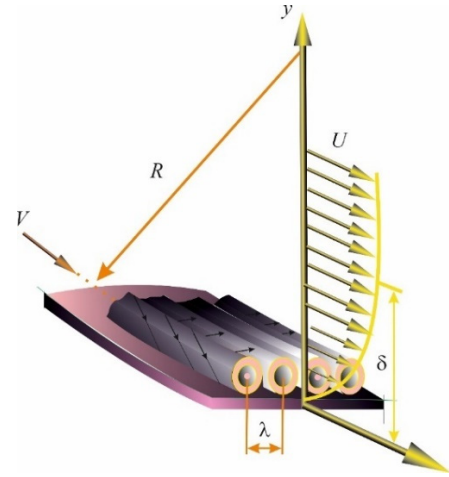


Рисунок 19 – Схема вихреобразования

Разработанная математическая модель формирования микропрофиля перемещением инструмента относительно заготовки описана полигармонической функцией:

$$x_I(t) = \sum_{k=1}^n x_k \sin(k\omega_0 t + \psi_k), \quad (13)$$

где x_k , ω_0 , ψ_k – константы, определяющие закон вибрационного движения инструмента.

Скорость движения инструмента определяется путем дифференцирования данной зависимости (13) и составляет:

$$V_I(x) = \sum_{k=1}^n x_k k \cdot \omega_0 \cos\left(\frac{k\omega_0 x}{V_z} + \psi_k\right), \quad (14)$$

где время $t=x/V_z$ выражено через координату инструмента x и V_z – скорость подачи.

Массовый расход жидкого металла в радиальной плоскости инструмента принимается пропорционально относительной скорости инструмента и заготовки:

$$G(x) = \rho K_q A_q V_I(x), \quad (15)$$

где ρ – плотность металла, кг/м^3 ; K_q – коэффициент распределения потока металла на части, одна из которых формирует стружку, а другая – обрабатываемую поверхность; A_q – переменная толщина срезаемого слоя по направлению подачи заготовки, м ; $V_I(x)$ – скорость перемещения цилиндрической поверхности инструмента, м/с .

Толщина срезаемого слоя описана полигармонической функцией поперечной координаты в виде:

$$A_q = \sum_{p=1}^B a_p \cos(p\omega_{py} y + \psi_{py}), \quad (16)$$

где a_p , ω_{py} и ψ_{py} – константы, которые зависят от формы заготовки, в частности, от наличия пазов.

Ординаты микропрофиля пропорциональны изменениям массового расхода жидкого металла $H(x, y) \sim G$ и описываются полигармонической функцией двух переменных вида:

$$H(x, y) = \frac{\rho K_q}{V_{\Pi}} \sum_{p=1}^B a_p x_k \omega_0 k \cdot \cos(p\omega_{py} y + \psi_{py}) \cdot \sum_{k=1}^n k \omega_0 \sin\left(\frac{k\omega_0 x}{V_{\Pi}} + \psi_{vk}\right), \quad (17)$$

где x_k , ω_0 , ψ_{vk} – константы, определяющие закон вибрационного движения инструмента.

В пятой главе проведены исследования адгезионных процессов наростообразования и явлений контактно-фрикционного взаимодействия при ТФР. В результате измерений установлены закономерности локализации и тенденции изменения площади нароста во времени. Установлены качественные и количественные характеристики наростообразования на цилиндрической и торцевой поверхностях инструмента на протяжении всего цикла обработки. Возникновение нароста связано с повышенным содержанием свободной энергии в адгезионно-активных центрах, что позволяет идентифицировать их путем травления поверхности поликристаллических материалов соответствующими реактивами. Для исследования микроструктуры использован метод полутеней. По изображениям точечных микроструктур невозможно выявить реальный тип дефекта, но их суммарное значение характеризует общее количество микроструктурных объектов, которые формируют структурные образования с высокой свободной энергией или повышенной величиной химического потенциала. Таким образом, плотность микроструктурных объектов характеризует поверхностное распределение зон с повышенной величиной химического потенциала, которые можно рассматривать как потенциальные центры адгезионной активности. Анализ полученных результатов позволяет сделать заключение, что при ТФР черных металлов на режущей поверхности инструмента генерируются адгезионно-активные зоны, представляющие собой скопления различных структурных элементов с высокой свободной энергией на ограниченных мезомасштабных участках. Для количественной оценки величин свободной энергии предложен коэффициент темно-серого оттенка (КТСО), который косвенно отражает химический потенциал микроструктурных объектов и их комбинаций.

Идентификация зон возможна путем травления предварительно полированной поверхности соответствующими реактивами аналогично травлению металлографического шлифа. В результате адгезионно-активные центры будут представляться как скопления темных микроструктурных объектов. Для количественной оценки адгезионно-активных структур предложены показатели: плотность темных микроструктурных объектов (n) и их удельная площадь (f), ранжированные по степени темно-серого оттенка согласно алгоритму цветовой сегментации.

В работе сформулированы предпосылки расчета процессов теплообразования и теплопередачи. Они базируются на введении малоподвижных T_1 и подвижных T_2, T_3 источников теплоты (см. рисунок 10). Малоподвижные источники теплоты соответствуют незначительным скоростям движения расплавленного металла, а движущиеся источники – интенсивному напорному движению жидкого металла. Определены закономерности тепловых потоков, которые возникают в инструменте и заготовке при обработке. Применены аналитические и численные методы. Проведен анализ теплопередачи аналитическим методом путем решения уравнения теплопроводности для малоподвижного и подвижного источников тепла.

Графические интерпретации процесса теплопередачи, построенные путем аналитического решения уравнения теплопроводности для малоподвижного и подвижного источников тепла, приведены на рисунках 20, 21.

Определено распределение температуры в заготовке и инструменте в виде зависимостей:

$$\Theta = \Theta_1 + \Theta_2 = \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \exp\left\{-\frac{xV}{2a_1}\right\} \times \times \left\{ \int_0^{a_m} \left\{ K_0 \left[\frac{V}{2a_1} \sqrt{x^2 + (y-y')^2} \right] + K_0 \left[\frac{V}{2a_1} \sqrt{x^2 + (y+y')^2} \right] \right\} dy' + \right.$$

$$+ \int_{-\Delta}^0 \exp \left\{ \frac{xV'}{2a_1} \right\} \cdot K_0 \left\{ -\frac{V}{2a_1} \sqrt{(x-x')^2 + (y-a_m)^2} \right\} dx + \int_0^{a_m} f(y') dy' + C_1 + \int_{-\Delta}^0 g(x') dx' + C_2, \quad (18)$$

где q – плотность теплового потока, Bm/m^2 ; $g(x')$ – функция одной переменной; λ , a_1 – коэффициенты теплопроводности, $Bm/(m \cdot K)$ и температуропроводности, m^2/c обрабатываемого материала соответственно; C_1 , C_2 , K – константы интегрирования.

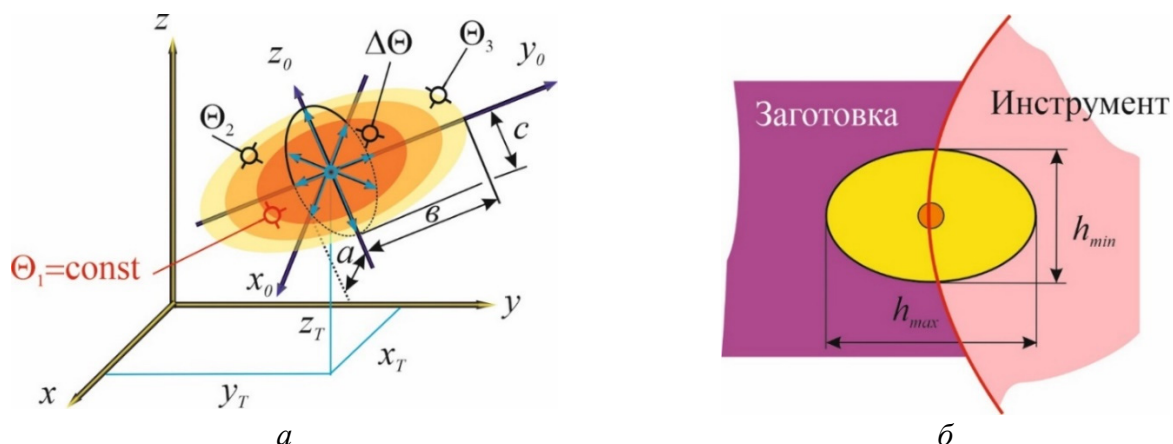


Рисунок 20 – Схема движения точечного теплового источника: а – ориентация осей эллипса; б – принципиальная схема распространения тепла

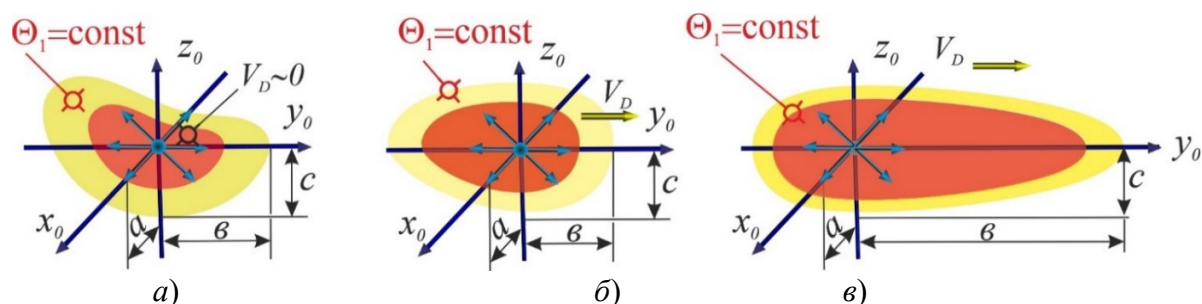


Рисунок 21 – Схема распространения тепла от точечного источника, расположенного в зоне контакта ТФД и заготовки: а – для малоподвижного источника теплоты; б – для движущегося источника теплоты; в – для источника, движущегося с большой скоростью

В результате расчетов определено поле температур в заготовке (рисунки 22, 23).

При нагревании металла заготовки имеют место значительные градиенты температур и явление переноса тепла за счет конвекции. В зоне резания имеют место существенные изменения параметров теплопроводности по направлениям.

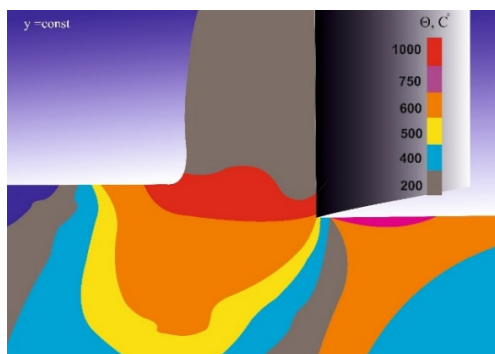


Рисунок 22 – Рассчитанное температурное поле в продольном сечении заготовки при наличии подвижного источника теплоты

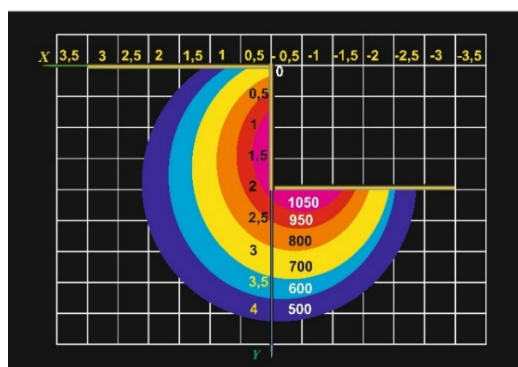


Рисунок 23 – Температурное поле в срезаемом слое в заготовке из стали 12X13: $a = 2 \cdot 10^{-3} m$; $B = 78,4 \cdot 10^{-3} m$; $V_D = 42 m/c$; $V_3 = 1,3 \cdot 10^{-3} m/c$

Также имеет место анизотропия теплофизических свойств системы. Анизотропия учтена введенным тензором теплопроводности (λ_{ij}), который определен в области стружкообразования. Соответственно определено поле вектора теплового потока $q(x, y, z)$, связанное с векторным полем градиента температур:

$$q_i = - \left[\lambda_{i1} \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \lambda_{i2} \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \lambda_{i3} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \right], \quad i = 1, 2, 3. \quad (19)$$

Для определения температурного поля в области стружкообразования использовано тензорное уравнение:

$$\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i \partial x_j} = 0. \quad (20)$$

Данное уравнение сведено к уравнению Лапласа, которое решено численным методом. Показано, что анизотропия теплофизических свойств является дополнительным фактором локализации теплообразования в тонком слое между инструментом и заготовкой, что положительно влияет на процесс обработки и повышает стойкость инструмента. Для интенсификации процесса теплоотвода от зоны резания предложено осуществить дополнительное местное охлаждение инструмента с использованием специальных устройств (тепловых труб). Теоретические исследования процессов теплопередачи дополнены экспериментальными измерениями распределения температуры в заготовке и в инструменте. Определено распределение температуры при различных режимах обработки. Установлено влияние рабочих параметров на максимальную температуру заготовки в непосредственной близости к зоне резания. Установлены рациональные режимы обработки. Они характеризуются окружной скоростью 40...80 м/с и подачей 200...500 мм/мин. Экспериментальные измерения проведены для различных заготовок, которые имеют вставки в пазах или отверстиях. Установлено, что наличие вставок снижает рабочие температуры заготовки на 5...10% по сравнению с обработкой однородных материалов.

В шестой главе разработаны инновационные конструкции специального инструмента, обеспечивающие целенаправленное термическое воздействие на процесс обработки путем рационального теплоотвода, необходимые параметры вибраций в динамической системе станка, формирование стружки и предотвращение образования нароста [24 – 35], выполнено математическое описание микро- и макрогеометрии инструмента, получена формула, характеризующая распределение параметра по всем участкам контура:

$$U(\rho, \phi, z) = \left[\sum_{m=0}^M C_{1m} \cdot \cos(k\phi) + C_{2m} \cdot \sin(k\phi) \right] \cdot \left[\sum_{k=0}^K C_{1k} \cdot \cos\left(2\pi k \frac{z}{l}\right) + \right. \\ \left. + C_{2k} \cdot \sin\left(2\pi k \frac{z}{l}\right) + C_{3k} \cdot ch(kqz) + C_{4k} \cdot sh(kqz) \right] \cdot \left[\sum_{n=0}^N a_n \cdot J_0(\rho_n, \rho) \right]. \quad (21)$$

В формуле (21) первая сумма в правой части описывает изменение параметра в зависимости от полярного угла ϕ . Изменение функции отклонений в зависимости от полярного угла ϕ определяет форму цилиндрических поверхностей инструмента, в частности их эксцентричность, овальность, огранку. Соответственно данная зависимость описывает изменение толщины слоя металла между инструментом и деталью. В зависимости от номера базовой функции она описывает соответствующую особенность реального контура инструмента. Базисная функция с номером $m = 0$ соответствует окружности с центром на оси инструмента. Функция с номером $m = 1$ при значениях констант C_{1m} , C_{2m} , гораздо меньших диаметра инструмента, соответствует окружности, центр которой

смещен относительно оси инструмента. Базисная функция при $m = 2$ описывает овальность сечения, а базисные функции по $m = 3, 4, 5, 6, \dots$ описывают огранку поверхности инструмента соответственно по 3, 4, 5 и более граням. Приведены результаты экспериментальных исследований вибрационных характеристик процесса комплексной обработки. Согласно разработанной методике проведены замеры общих параметров вибрации и частотного спектра вибрационного сигнала при разной частоте вращения ТФД. Контролируемый частотный диапазон (10...1000 Гц); (10...4000 Гц); (18...10000 Гц). При замерах использованы измерители ускорения и анализатор спектра модели Вибротест-МГ4. Замеры проведены для различных условий обработки, в частности для обработки заготовки на двухкоординатном вибрационном столе при жестко установленной заготовке (рисунок 23, а), а также для гибкой заготовки (рисунок 24, б). При работе в рабочем режиме проводились замеры вибрации на протяжении цикла обработки. Показано, что значение виброперемещения составляет 26...30 мкм (среднеквадратическое значение) и соответствует регламентному виброперемещению станка. Значения виброскорости – 3,3...3,7 мм/с (среднеквадратическое значение) несколько повышены относительно средних режимов станочного оборудования, но не превышают допустимого значения, которое составляет 4,5 мм/с.

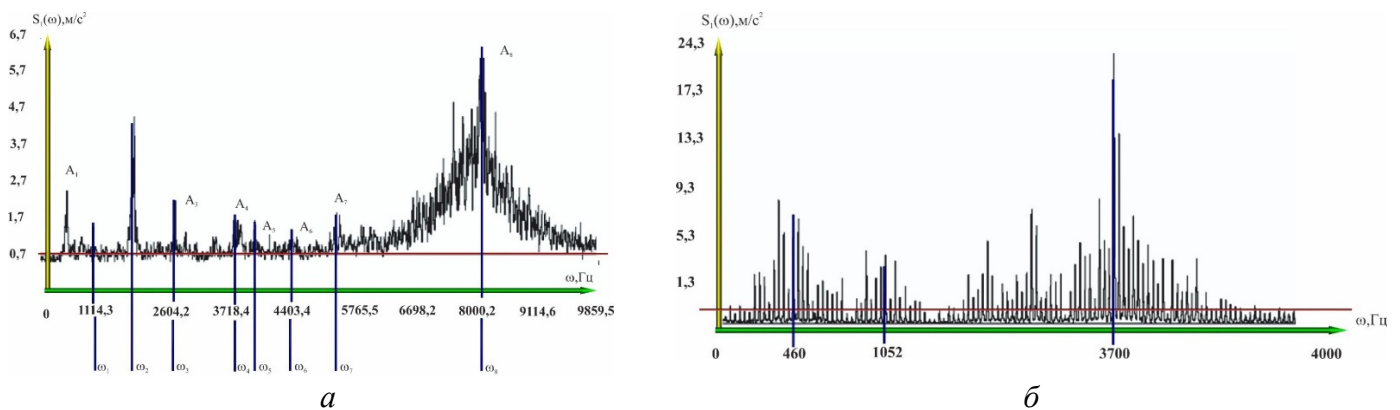


Рисунок 24 – Типичная спектральная плотность виброускорения заготовки, измеренная в процессе ТФР (а) и набор изгибающих спектров виброускорений, полученных при обработке детали при разном расположении пазов (б)

Разработана специальная методика анализа экспериментально определенных спектральных характеристик вибраций в динамической системе станка. Методика базируется на использовании огибающих спектров виброперемещений, виброскорости и виброускорений. Огибающие спектров обобщают свойства случайных колебательных процессов (рисунок 24, б). Для обработки результатов экспериментальных измерений применен массив огибающих экспериментально измеренных спектров.

В седьмой главе приведены результаты исследований процесса ТФР при наличии целенаправленного вибрационного воздействия.

Для целенаправленного выбора параметров вибрационных перемещений детали проведено математическое моделирование перемещений стола при воздействии на него случайных нагрузок, обусловленных силами резания. Для расчетных колебаний, динамическая модель стола представлена в виде одностепенной системы, имеющей две степени свободы:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_x \frac{dx}{dt} + f_{hx}(V_x) + c_x x = F_n(t) + f_{px}(y); \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + h_y \frac{dy}{dt} + f_{hy}(V_y) + c_y y = F_\tau(t) + f_{py}(x), \end{cases} \quad (22)$$

где m – эквивалентная масса стола; h_x, h_y – коэффициенты сопротивления при движении стола в направлениях x и y соответственно; c_x, c_y – эквивалентные жесткости динамической системы стола; $F_n(t), F_\tau(t)$ – проекции случайной силы резания, действующей со стороны инструмента на стол; $f_{hx}(v_x), f_{hy}(v_y)$ – нелинейные составляющие сил сопротивления, которые зависят от проекций скорости стола v_x и v_y ; $f_{px}(y), f_{py}(x)$ – функции, описывающие взаимное влияние колебаний стола в направлениях x и y соответственно

В результате проведенных исследований процесса взаимодействия инструмента и расплавленного металла установлено, что нелинейные составляющие сил сопротивления приближенно соответствуют квадратичным функциям проекций скоростей:

$$f_{hx} = b_{hx} v_x^2 \text{sign}(v_x); f_{hy} = b_{hy} v_y^2 \text{sign}(v_y),$$

где b_{hx}, b_{hy} – постоянные коэффициенты; $\text{sign}(v_x), \text{sign}(v_y)$ – сигнум функции.

В первом приближении принята линейная параметрическая связь между перемещениями стола и соответствующими силовыми действиями, а именно:

$$f_{px} = q_x y; f_{py} = q_y x,$$

где q_x, q_y – постоянные коэффициенты параметрической связи перемещений с соответствующими силовыми факторами, действующими на стол перпендикулярно перемещениям.

Принято считать, что сила резания $F^*(t)$ изменяется случайным образом и представляет собой широкополосный случайный процесс, спектральная плотность которого имеет постоянное значение в диапазоне рабочих частот колебаний динамической системы. При этом изменения угла действия силы являются незначительными и можно принять угол действия вектора силы $\alpha = \text{const}$.

С учетом указанных предположений система уравнений (22) представлена в виде зависимостей:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} + h_x \frac{dx}{dt} + c_x x = F^*(t) \sin \alpha + q_x y - b_{hx} v_x^2 \text{sign} v_x, \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} + h_y \frac{dy}{dt} + c_y y = F^*(t) \cos \alpha + q_y x - b_{hy} v_y^2 \text{sign} v_y. \end{cases} \quad (23)$$

Полученная система уравнений (23) приведена к операторному виду путем преобразования по Лапласу. Решение системы в операторах определяет проекции перемещения стола в виде зависимостей:

$$\begin{cases} X(s) = W_x(s) [F^*(t) \sin \alpha + q_x y - b_{hx} v_x^2 \text{sign} v_x] \\ Y(s) = W_y(s) [F^*(t) \cos \alpha + q_y x - b_{hy} v_y^2 \text{sign} v_y] \end{cases} \quad (24)$$

где s – оператор Лапласа; $X(s), Y(s)$ – изображение по Лапласу перемещений стола в направлениях x и y соответственно.

Передаточные функции системы, входящие в выражение (24), имеют вид:

$$W_x(s) = \frac{1}{ms^2 + h_x s + c_x}, \quad W_y(s) = \frac{1}{ms^2 + h_y s + c_y}. \quad (25)$$

Операторная система уравнений (24) с учетом выражений (25) послужила основой для разработки структурной математической модели динамических перемещений стола

с параметрическими связями по координатам. Сила резания задается в виде широкополосного случайного процесса – «белого шума». В качестве выхода модели приняты проекции на ось X виброперемещения x и виброскорости v_x стола. При моделировании задавались различные виды входных параметров, а результаты моделирования перемещений инструмента подвергались статистической обработке. По разработанной модели выполнены расчеты перемещений детали при случайных силах резания. В частности, произведен расчет виброскорости v_x в направлении x (рисунок 25). В результате расчетов установлено, что виброскорость представляет собой широкополосный случайный процесс. С целью проверки адекватности разработанной модели проведено сравнение расчетов с экспериментальными данными (рисунок 26) с помощью статистических методов.

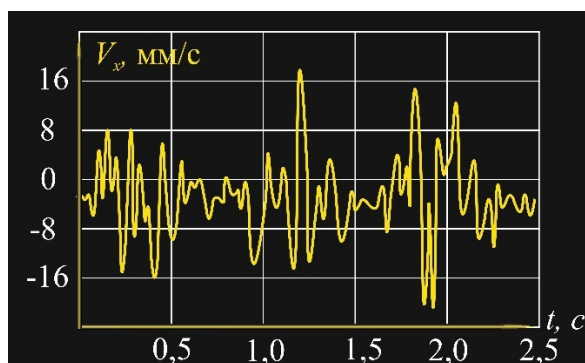


Рисунок 25 – Моделирование виброскорости стола в направлении подачи

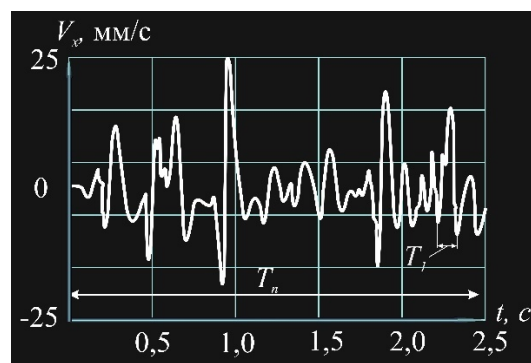


Рисунок 26 – Экспериментальные кривые виброскорости стола

Принята гипотеза о стационарности и эргодичности стохастических колебательных процессов в динамической системе. Для расчетных и экспериментально определенных реализаций виброскорости стола определены корреляционные функции (рисунок 27). Отклонение значений расчетных и экспериментальных корреляционных функций виброскорости находится в пределах 5...7%. Это подтверждает адекватность разработанной математической модели. По разработанной математической модели выполнены расчеты частот собственных колебаний стола в зависимости от изменения параметров жесткости и коэффициента сопротивления стола (рисунок 28). Показано, что изменение жесткости вибрационного стола в широких пределах изменяет собственную частоту колебаний и соответственно – волнистость обработанной поверхности.

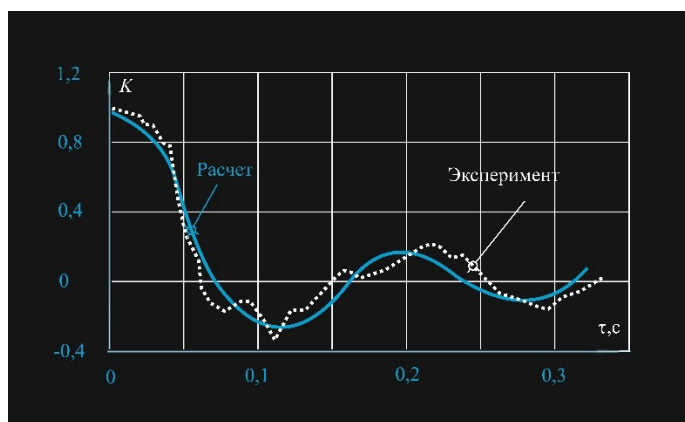


Рисунок 27 – Расчетные (сплошная кривая) и экспериментально определенные (пунктирная кривая) значения корреляционных функций виброскорости стола

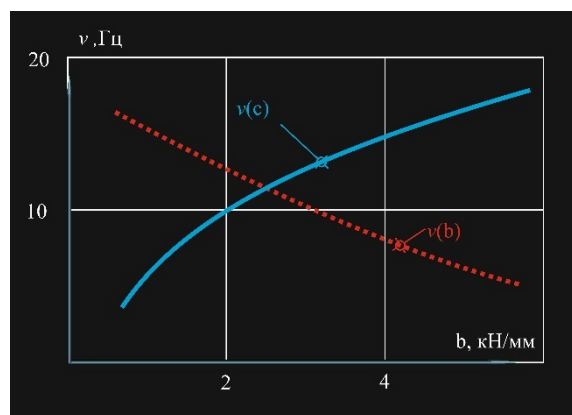


Рисунок 28 – Зависимость собственной частоты виброперемещений стола от параметра жесткости и коэффициента сопротивления стола

При моделировании вибраций для оценки спектра возмущений получена зависимость:

$$P(t) = P_m \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} I_k \left(\frac{1}{\omega_0 \pi} \right) \sin [(\omega_H + k\omega_0) \cdot t], \quad (26)$$

где P_m – нормированное динамическое возмущение; I_k – функция Бесселя 1-го рода k -го порядка; ω_H – номинальное значение частоты вращения инструмента; ω_0 – элементарный базовый прирост частоты.

Для расчета перемещения стола при наличии возмущений построена модель:

$$x_c(t) = \rho P_m \sum_{k=1}^n a_1 \omega_0 k \cdot \sin(\omega_y y_m + \psi_{1y}) \cdot W_x(k\omega_0) \cdot \sin \left[k\omega_0 t + \omega_H t + \frac{\pi}{2} + \psi_x(k\omega_0) \right],$$

где $x_c(t)$ – перемещения вибрационного стола, амплитудно-частотная $W_x(\omega)$ и фазо-частотная $\psi_x(\omega)$ характеристики.

Осуществлено моделирование процесса ТФР при наличии демпферов колебаний. Динамическая система ТФР представлена в виде трех масс с упруго-диссипативными связями.

На основе динамической модели составлены дифференциальные уравнения и определена передаточная функция системы в виде:

$$W(S) = \frac{y(s)}{P(s)} = \frac{K}{\left[(T^2 S^2 + 2\xi TS + 1) - \frac{(K_o + K_{o1}S)(K_1 + K_2S)}{T_1^2 S^2 + 2\xi_1 T_1 S + 1} - \frac{(K_o + K_{o1}S)(K_3 + K_4S)}{T_2^2 S^2 + 2\xi_2 T_2 S + 1} \right]}.$$

По передаточной функции системы найдена частотная передаточная функция путем подстановки ($S \rightarrow j\omega, j\sqrt{-1}$) и приведены частотные характеристики динамической системы (рисунок 29). На основе расчетов квадрата модуля частотной передаточной функции определена спектральная плотность случайных колебаний инструмента с демпфером (рисунок 30).

Проведен синтез системы оптимального демпфирования колебаний инструмента при ТФР. Установлен оптимальный диапазон изменений параметров демпфера, который обеспечивает наиболее эффективные законы его колебательного движения и оптимальные характеристики динамической системы.

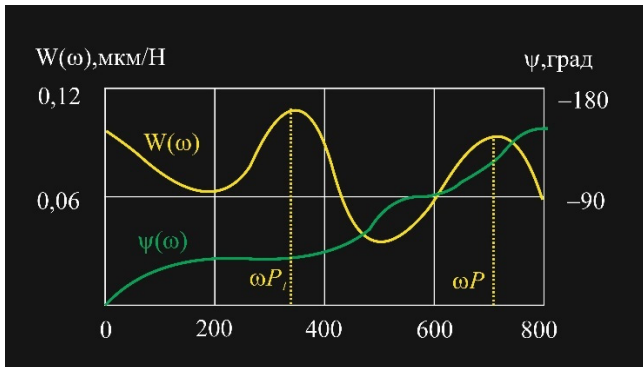


Рисунок 29 – Частотные характеристики динамической системы инструмента с демпфером

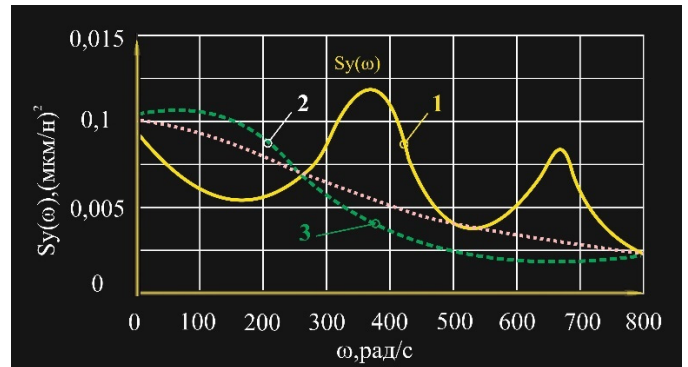


Рисунок 30 – Расчетные значения спектральной плотности случайных колебаний инструмента с демпфером (пунктиром показана характеристика при наличии оптимального демпфера)

Выполнено обобщение огибающих процессов с помощью линейной математической модели в виде передаточной функции $W(s)$, которая является отношением двух полиномов. Соответственно разработанной модели осуществлено описание спектров вибрационных параметров динамической системы станка с помощью аддитивной модели вида:

$$S_Y(\omega) = \sum_{v3} \frac{D_{3v} \alpha_v / \pi}{\alpha_v^2 + \omega^2} + \sum_{v1,2} \frac{D_{2v} \alpha_v (\alpha_v^2 + \beta_v^2)}{\omega^4 + 2(\alpha_v^2 - \beta_v^2) \omega^2 + (\alpha_v^2 + \beta_v^2)^2} + \sum_{v1,2} \frac{D_{1v} \alpha_v (\omega^2 + \alpha_v^2 + \beta_v^2)}{\omega^4 + 2(\alpha_v^2 - \beta_v^2) \omega^2 + (\alpha_v^2 + \beta_v^2)^2}, \quad (27)$$

где константы D, α, β определены по результатам экспериментальных измерений огибающих.

Первая сумма в правой части формулы (27) учитывает безрезонансные составляющие случайных колебаний. Вторая сумма учитывает резонансные, независимые друг от друга колебания системы. Третья сумма учитывает взаимосвязанные случайные колебательные процессы. Количество составляющих, константы, которые входят в формулу (27), определены по результатам измерений спектральной плотности виброускорений. Математическая модель обобщает вибрационные параметры ТФР по сравнению с режимом холостого хода станка. На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по обеспечению необходимых вибрационных показателей обработки.

Для обеспечения стабильности выходных показателей качества изделий на операциях ТФР разработана динамическая модель операции, которая в векторно-матричной форме имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{Y}_0 &= A_0 \cdot Y_0 + B_0 \cdot \Psi + C_0 \cdot U; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Y_0 + F_0 \cdot V_0; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0, \end{aligned} \quad (28)$$

где $\dot{Y}_0$ – матрица производных состояний процесса ТФР; A_0 – матрица состояния процесса ТФР; Y_0 – матрица-столбец, представляющая вектор состояния системы; B_0 – матрица интенсивности возмущений (параметров влияния торцового биения инструмента и неравномерности припуска заготовки); Ψ – матрица шумов, воздействующих на процесс ТФР (неравномерности припуска от заданных значений Ψ, Ψ_1, Ψ_2); C_0 – матрица интенсивности управления температурой в зоне резания; U – матрица управления температурой (глубиной резания); Z_0 – вектор наблюдений за состоянием технологической операции ТФР; E_0 – матрица измерений выходных показателей процесса ТФР; F_0 – матрица интенсивностей погрешностей измерителей; V_0 – матрица шумов приборов активного контроля; T_0 – вектор восстановления системы; Q_0 – матрица интенсивности совокупных измерений.

Для решения задачи оценки температуры в зоне резания и скорости ее изменения может быть использована теория стохастических наблюдателей, на основе которой может быть построен стохастический наблюдатель Льюинбергера.

Непосредственное использование существующих методик синтеза стохастических наблюдателей при описании процесса ТФР невозможно из-за наличия шумов в канале управления и значительных вычислительных ошибок с погрешностями многократного дифференцирования отклонений торцового биения и неравномерности припуска. Это не является ни особенностью матричного представления модели, ни описания динамической системы в отклонениях, а проявляется уже в исходном представлении (28). Для решения этой проблемы был разработан метод преобразования модели (28) к виду, не содержащему производных шумов, и, следовательно, не требующему их дифференцирования. После использования разработанной методики модель (28) приобрела вид:

$$\begin{aligned}
\dot{F} &= A_0 \cdot F + B_1 \cdot \Psi_1 + C_1 \cdot U; \\
Z_0 &= E_0 \cdot F + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot S; \\
T_0 &= Q_0 \cdot Z_0,
\end{aligned} \tag{29}$$

где $\dot{F} = [\dot{F}_1 \ \dot{F}_2 \ \dot{F}_3 \ \dot{F}_4]^T$ – транспонированная матрица производных состояний системы; C_1 – преобразованная матрица интенсивностей управления; B_1 – преобразованная матрица интенсивности возмущений; D_M – матрица интенсивностей управления измерителями; S – матрица управления измерениями.

На основе обработки экспериментальных данных построена корреляционная функция, моделирующая шумы возбуждений, вызванные отклонениями формы ТФД (рисунок 31):

$$K_i(v_i, \tau) = K_{0i} \cdot \exp(\alpha_i v_i |\tau_i|) \cdot \cos(\beta_i v_i \tau_i), \tag{30}$$

где v_i – скорость резания; $K_{0i}, \alpha_i, \beta_i$ – параметры корреляционной функции.

В практически важных случаях эффекты, обуславливаемые взаимно корреляционными функциями процессов и соответствующими энергетическими взаимными спектральными плотностями, малы относительно энергетических спектральных характеристик ТФД (рисунок 32).

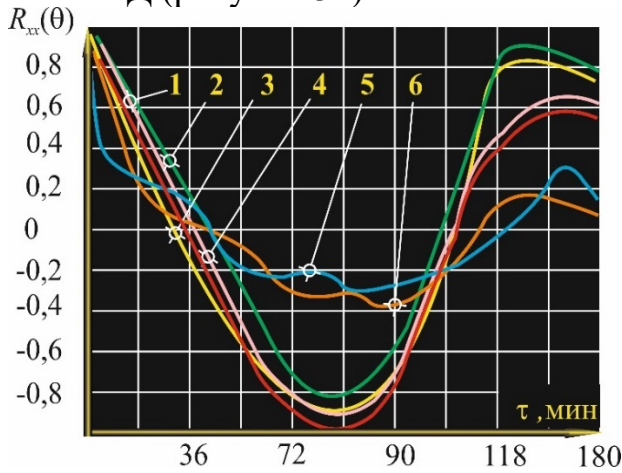


Рисунок 31 – Корреляционные кривые профиля ТФД $R_{xx}(\theta)$ за период его стойкости: 1 – для $\tau = 0$ мин; 2 – для $\tau = 60$ мин; 5 – для $\tau = 180$ мин (данные Н. И. Покинтелыцы) 3 – для $\tau = 0$ мин; 4 – для $\tau = 60$ мин; 6 – для $\tau = 180$ мин (по данным автора)

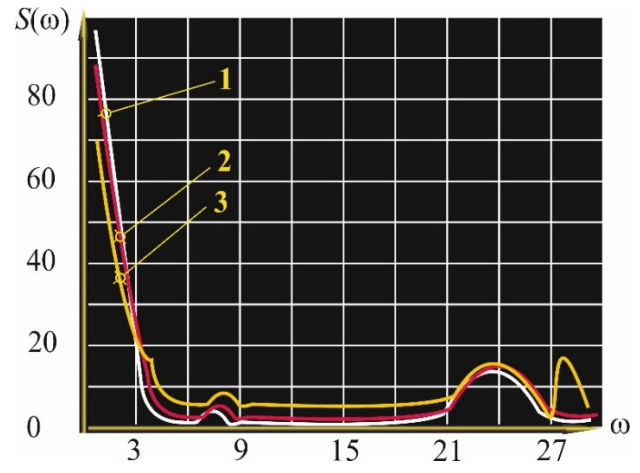


Рисунок 32 – Спектрограммы профиля ТФД $S(\omega)$ за период его стойкости: 1 – для $\tau = 0$ мин; 2 – для $\tau = 60$ мин; 3 – для $\tau = 180$ мин

Для построения динамического звена, моделирующего динамику шумов возбуждения, для условий ТФР построен формирующий фильтр:

$$\begin{aligned}
\dot{G} &= A_f G + B_f w; \\
R &= C_f \cdot G; \\
H_f &= Q_f \cdot R,
\end{aligned} \tag{31}$$

$$\text{где } \dot{G} = \begin{bmatrix} \dot{G}_1 \\ \dot{G}_2 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix}; \quad A_f = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}; \quad B_f = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}; \quad Q_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad R = C_f G;$$

$C_f = [1 \ 0]$; $T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}$; $T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$; $T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$; $K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}$; w – единичный гауссовский белый шум.

С учетом (31) расширенная модель системы (29) приобретает вид:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{F} \\ \dot{G}_f \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_0 & B_1 \cdot Q_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot U + \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix} \cdot W; \\ Z_0 &= E_0 \cdot Q_0 \begin{bmatrix} F \\ G_f \end{bmatrix} + F_0 \cdot V_0 + D_M \cdot U; \\ T_0 &= Q_0 \cdot Z_0. \end{aligned} \quad (32)$$

Первые два уравнения системы (32) приведены к виду:

$$\begin{aligned} X &= A \cdot X + B \cdot U + E \cdot W; \\ Z &= C \cdot X + R \cdot V. \end{aligned} \quad (33)$$

Полученное в работе математическое описание процесса ТФР позволяет поостроить стохастический наблюдатель Льюнбергера, который дает возможность получать оптимальные значения параметров вектора состояния объекта путем решения матричного уравнения Риккати:

$$\dot{\tilde{V}} = A \cdot \tilde{V} + \tilde{V} \cdot A^T + E \cdot \Psi_w \cdot E^T - \tilde{V} \cdot C^T \cdot \Psi_v^{-1} \cdot C \cdot \tilde{V}. \quad (34)$$

Тогда алгоритм фильтрации наблюдений определяется матричными уравнениями:

$$\begin{aligned} \hat{Y} &= A \cdot \hat{Y} + B \cdot U + K \cdot [Z - B \cdot U - C \cdot \hat{X}]; \\ \begin{bmatrix} \hat{T}(t_f) \\ \hat{T}(i_f) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \hat{Y}, \end{aligned} \quad (35)$$

где $K = \tilde{V} \cdot C \cdot \Psi_v^{-1}$ – матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана.

На основе теоремы разделения оптимальный регулятор строится в детерминированной постановке с использованием результатов оценок, приведенных выше:

$$I = M \left[\frac{1}{2} x^T(t_\phi) Q_1 x(t_\phi) + \frac{1}{2} \int_0^{t_\phi} (x^T Q_2 x + u^T Q_3 u) dt \right], \quad (36)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – соответствующие весовые матрицы качества управления.

Для алгоритма управления справедлива следующая структура:

$$u^*(t) = -B_1^{\wedge} \hat{x}(t), \quad (37)$$

где $B_1 = Q_3^{-1} G^T \tilde{P}_1$ – матрица, стабилизации процесса ТФР.

Матрица $\tilde{P}_1$ находится путем решения уравнения Риккати:

$$\dot{\tilde{P}}_1 = -\tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\phi \end{bmatrix}^T \cdot \tilde{P}_1 + \tilde{P}_1 \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \times Q_3^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \tilde{P}_1 - Q_3, \quad \tilde{P}_1(0) = \tilde{P}_{10}. \quad (38)$$

С (29), (37), (38) построена САУ процессом ТФР:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \hat{\dot{Y}} \\ \hat{\dot{\Psi}} \\ \hat{\dot{\Phi}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} F_0 & 0 & 0 \\ 0 & F_\psi & 0 \\ 0 & 0 & F_\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot Q_3^{-1} \begin{bmatrix} G_0 & 0 & 0 \\ 0 & G_\psi & 0 \\ 0 & 0 & G_\varphi \end{bmatrix}^T \cdot P_1 \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} + \\
&+ P \cdot \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}^T \cdot \Omega^{-1} \times \left[z(t) - \begin{bmatrix} I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y} \\ \hat{\Psi} \\ \hat{\Phi} \end{bmatrix} \right], \quad \hat{X}(0) = \bar{X}(0).
\end{aligned} \tag{39}$$

Проведение испытаний предложенных систем управления при обработке заготовок на операциях ТФР свидетельствует об улучшении качества обработанной поверхности, например, шероховатости поверхности детали «кронштейн» снизилась в два раза по показателю Rz , дисперсия показателя микротвёрдости обработанной поверхности снизилась в 2...8 раз, в сравнении с обработкой по жесткому программному циклу.

Восьмая глава посвящена расчету оптимальных циклов ТФР, проверке полученных технических решений и внедрению результатов теоретических и экспериментальных исследований в промышленность. Для построения предельных граничных циклов в работе было выполнено формализованное описание ограничений. Понятие предельного граничного цикла ТФР основано на свойстве достижимости стабильности заданного качества выпускаемой продукции, характеризующем выпуск изделий с гарантированными параметрами качества, изготовленными в разное время независимо от воздействия внешних факторов, находящихся в некоторых границах, и определяющих предельные параметры технологических циклов. Для оптимизации циклов определены ограничения, которые представлены моделями в виде равенств и неравенств, составлена математическая модель процесса ТФР и решена задача оптимизации цикла.

Система полученных неравенств с уравнением целевой функции представляет математическую модель оптимизации режимов резания, для решения которой применим известный метод динамического программирования, позволяющий определить оптимальные режимы и область их допустимых значений. Например, решение задачи оптимизации ТФР плоской отливки ($b = 70$ мм, $a = 3$ мм) из стали 12X13 ($a_1 = 6,18$ мм²/с, $\eta_{пл} = 1200$ °C) на станке SPINNER VC 750 ТФД из стали 50 ($D_\partial = 500$ мм, $r = 0,2$ мм. $\gamma = 0^\circ$, $\alpha = 11^\circ$, $\alpha_y = 3^\circ$, $\psi_B = 8^\circ$), $Rz = 60$ мкм с использованием этих экспериментальных исследований позволило получить значение $V_{S,ont} = 120$ мм/мин, $n_{ont} = 2500$ мин⁻¹, $V_{\partial,ont} = 52$ м/с. При этом область допустимых значений ограничивается предельной температурой нагрева Θ зоны резания, заданной стойкостью T диска, мощностью N_{cm} привода главного движения станка и кинематикой станка: n_{min} , n_{max} , V_{Smax} .

Что касается оптимизации по минимальной себестоимости, то, как показывают расчеты, себестоимость операции ТФР, соответствующая режиму максимальной производительности, превышает на 4,5% минимальную себестоимость.

В таблице 1 представлены данные для выбора режимов резания в зависимости от толщины и ширины среза на вертикально-фрезерном станке с мощностью главного привода 14 кВт при обработке плоскостей.

При промышленном внедрении были использованы рекомендации по выбору температур нагрева, устройства для получения переменной подачи и устройства для предотвращения наплывов.

Таблица 1 – Рекомендованные режимы для обработки плоскостей методом ТФР

Материал заготовки	Толщина срезаемого слоя, мм	Ширина обработки, мм			Интервал температуры контактной поверхности, °C
		60 – 70	80 – 90	90 – 100	
		Подача стола, мм/ мин			
Сталь 45	2	200	180	160	800...1200
	2,5	180	160	125	
	3	160	125	100	
Сталь 09Х15Н8Ю (ЭИ904)	1	95	80	72	900...1150
	1,5	85	70	64	
	2	72	62	58	
	2,5	66	55	52	
	3	60	50	45	
Сталь 76Ф	1	180	140	120	820...1180
	1,5	160	125	115	
	2	150	120	105	
	2,5	145	115	90	
	3	120	100	85	

На рисунке 33 приведен пример расчетного цикла ТФР для заготовок из стали 45. Материал ТФД – сталь 65Г. Окружная скорость ТФД – 45 м/с.

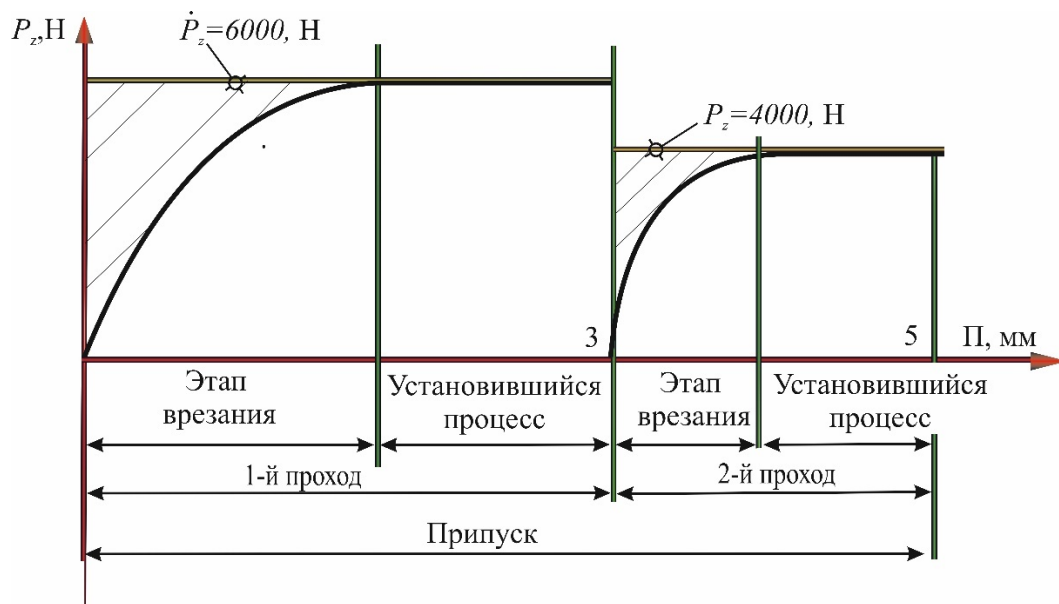


Рисунок 33 – Пример расчетного цикла ТФР

Для обработки деталей в заводских условиях система (40) динамической стабилизации (рисунок 34) была упрощена из предположений, что в динамической системе станка наименее устойчивым звеном является система «диск-шпиндель», и следовательно, $c_2 \gg c_1$, $h_2 \gg h_1$, $c_2 \rightarrow \infty$, $h_2 \rightarrow \infty$. Промышленные испытания САУ на «ООО «ПК ТпЮГ» (г. Симферополь) проводились при обработке деталей из стали 40Х, инструментом из стали 65Г. Диапазон исследуемых режимов резания определялся по данным, полученным в результате оптимизации цикла ТФР. Все заготовки, обработанные со стабилизацией цикла по шероховатости поверхности, по допуску на изготовление соответствовали заводским требованиям. Отмечено улучшение качества и повышение стабильности процесса (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные результаты качества поверхностей, обработанных заводской и предлагаемой технологиям

Отклонение от заданного размера Δ , мкм					Шероховатость поверхности R_a , мкм					
По заводской технологии										
		max	min	дисперсия σ^2 , мкм ²			max	min	дисперсия σ^2 , мкм ²	
№ партии	1	250	100	625	№ партии	1	6,3	4,1	0,13	
	2	230	90	544		№ партии	2	6,2	4,2	0,11
	3	240	136	400			№ партии	3	6,3	4,6
Σ_j		240	103	523	Σ_j			6,25	4,6	0,52
По предлагаемой технологии										
№ партии	1	140	50	225	№ партии	1	4,5	3,0	0,06	
	2	160	80	178		№ партии	2	4,3	2,9	0,05
	3	200	90	336			№ партии	3	4,4	2,9
Σ_j		170	73	247	Σ_j			3,76	2,7	0,056
Σ_i / Σ_j				2,2	Σ_i / Σ_j					9,2

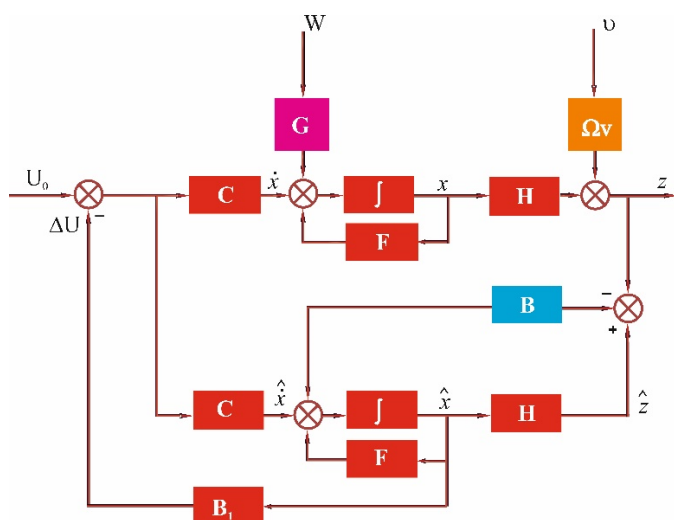


Рисунок 34 – Структурная схема системы управления процессом ТФР

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \hat{X} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F & -CB_1 \\ BH & F - CB_1 - BH \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \hat{X} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G \\ 0 \end{bmatrix} \times W + \begin{bmatrix} 0 \\ B \cdot \Omega \end{bmatrix} \times v \quad (40)$$

Предлагаемая САУ обеспечивает наилучшую оценку вектора состояния ТС, что позволяет для управления процессом кроме скоростных характеристик (например, подачи) использовать скорости их изменения, и реализовать векторное управление по скорости перемещения инструмента и его ускорению.

Это позволило в сравнении с традиционной обработкой обеспечить стабильное качество изделий и снизить значения дисперсий по размеру поверхностей – в 2,2 раза, по шероховатости – в 9,2 раза. Использование предлагаемого способа и САУ позволило снизить время на обработку деталей. Наиболее значительно время снижается для первой заготовки – в 1,42...1,5 раза, для второй – в 1,38...1,40 раза. В среднем производительность процесса ТФР повышается на 20%. Для реализации САУ процессом ТФР в производственных условиях потребовалась модернизация системы питания шпиндельного узла.

Были даны рекомендации по усовершенствованию опорной системы шпиндельного узла станков, о целесообразности замене опор качения на гидростатические. Применение гидростатических опор позволило: повысить надежность опор за счет того, что дросселирующие элементы при работе находятся в движении, не наблюдается

заращение дросселирующей щели; снизить нагрев опоры вследствие увеличения потока смазочного материала через опору по мере нагрева; повысить жесткость и несущую способность слоя смазочного материала; исключить наладочные работы по установлению рабочего давления в карманах опоры.

Приведены результаты исследований параметров качества обработанных поверхностей и рекомендации по режимам ТФР и его применению. Исследованы физико-химические свойства поверхностей на разных участках. В результате исследований установлено, что на поверхности впадин имеется значительное количество окислов (процент кислорода 30...40%). Пленка оксидов стабильна, имеет повышенную твердость. Плоские участки соответствуют материалу заготовки. Для предотвращения трещинообразования рекомендуется нагрев обработанной поверхности с постепенным охлаждением. Предотвратить трещинообразование можно используя специальные вставки из среднеуглеродистой стали. Трещинообразование является результатом наличия остаточных напряжений на обработанной поверхности.

Важной характеристикой физического состояния поверхностного слоя является величина и знак остаточных напряжений. Остаточные напряжения возникают в результате неравномерности пластической деформации и значительного нагрева поверхностных слоев. Установлено, что в деталях из сталей 12X13, 12X18H12T и 09X15H8Ю в поверхностном слое возникают сжимающие остаточные напряжения, максимум которых составляет 65...110 МПа, глубина залегания $y = 100...140$ мкм. В деталях из стали 45 в поверхностном слое в тонких слоях, глубиной 6...11 мкм с максимумом на поверхности образца ($\sigma = 450...1160$ МПа), которые переходят в сжимающие ($\sigma_{\text{ост. max}} = -200...600$ МПа) и распространяются на глубину $y = 100...300$ мкм (рисунки 35, 36).

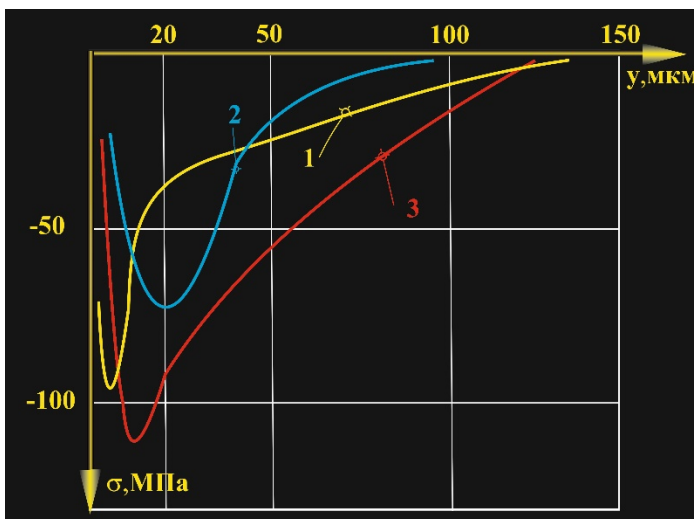


Рисунок 35 – Остаточные напряжения в поверхностном слое заготовки из стали 09X15H8Ю (1, 2, 3 – кривые, соответствующие разным участкам измерений)

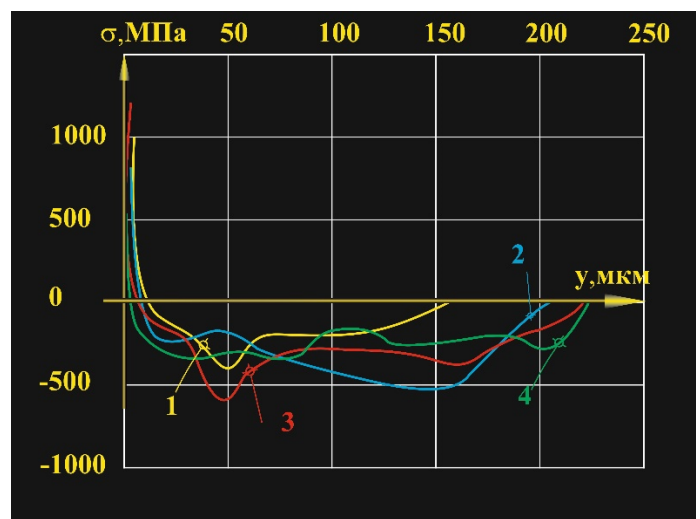


Рисунок 36 – Остаточные напряжения в поверхностном слое заготовки из стали 45 (1, 2, 3, 4 – кривые, соответствующие разным участкам измерений)

После удаления слоя металла толщиной 0,1 мм проводились измерения твердости на участках, где был снят металл. Осуществлено 12 измерений твердости в каждой из 18 точек обработанной поверхности. Результаты измерений представлены в виде таблицы, где номер строки соответствует десятой доле миллиметра снятого поверхностного слоя детали (таблица 3).

Произведены измерения твердости по глубине обработанной поверхности,

полученной при обработке. Установлено, что твердость обработанной поверхности превышает твердость основного материала детали.

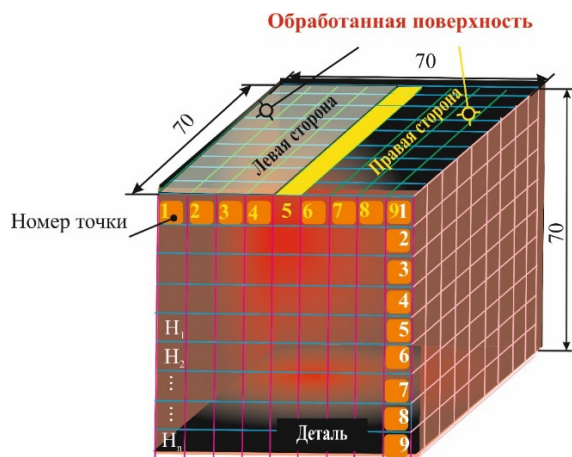


Рисунок 37 – Схема расположения точек, в которых проведены измерения твердости поверхности

Твердость поверхности определяется в результате специальных исследований. Для этого проведены замеры твердости обработанной поверхности в 18 точках (рисунок 37). В колонках таблицы 3 показана последовательно твердость поверхности по глубине детали. Измерения произведены в 9 точках с левой и в 9 точках с правой стороны обработанной поверхности. Сначала измерена твердость исходной поверхности детали (точка 5). Исследования поверхностного слоя по

сечению образцов показали наличие зоны термического воздействия на глубину до 0,6 мм. В поверхностном слое деталей на глубину до 0,2 мм наблюдается значительное изменение зерна основной структуры и увеличение твердости. Вследствие действия высокой температуры и удельного давления, сопровождающих процесс обработки, в поверхностном слое происходят сложные деформации (сдвиг со сжатием), зерна микроструктуры вытягиваются в направлении обработки.

Таблица 3 – Результаты измерений твердости (HВ) в 10 точках с левой стороны детали

Толщина слоя металла, который снимался, в десятых долях мм	Номер точки измерений									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	252	187	216	250	250	254	285	282	277	241
1	223	209	209	212	218	217	274	258	232	283
2	184	187	176	208	200	208	233	234	228	250
3	145	165	142	204	163	198	191	209	224	249
4	146	161	156	177	167	165	167	170	168	286
5	147	157	170	170	152	157	164	175	170	183
6	143	145	162	170	150	148	152	170	160	170
7	138	134	154	137	150	161	166	173	153	177
8	134	122	146	157	122	142	145	140	136	155
9	131	116	136	149	126	138	150	154	158	137
10	128	110	126	140	131	134	142	145	140	136
11	125	104	116	132	135	130	134	135	123	136

Исследовано изменение твердости на различной глубине детали. Изменения твердости имеют стохастический характер (рисунки 38, 39).

Наиболее вероятные значения твердости $m(h)$ аппроксимированы экспоненциальной зависимостью вида:

$$m(h) = HRC_M(1 + e^{-kh}),$$

где HRC_M – средняя твердость материала заготовки; k – коэффициент, ($k=1,8...2,2 \text{ мм}^{-1}$). В результате исследований разработаны рекомендации по промышленному применению методов ТФР.

Обработка ТФД обеспечивает получение высокого качества поверхности в виде площадок, материал которых соответствует материалу заготовки и канавок, поверхность

которых покрыта стабильной пленкой окислов с содержанием кислорода 20...40%. При ТФР обеспечивается шероховатость поверхности $Rz\ 40...Rz\ 80$. Структура поверхностного слоя изменяется на глубину до 0,6...1 мм. Сталь 45 до 0,2 мм имеет мелкодисперсную структуру типа тростит. В более глубоких слоях появляется феррит, а затем имеет место постепенный переход к перлитно-ферритной структуре сердцевины.

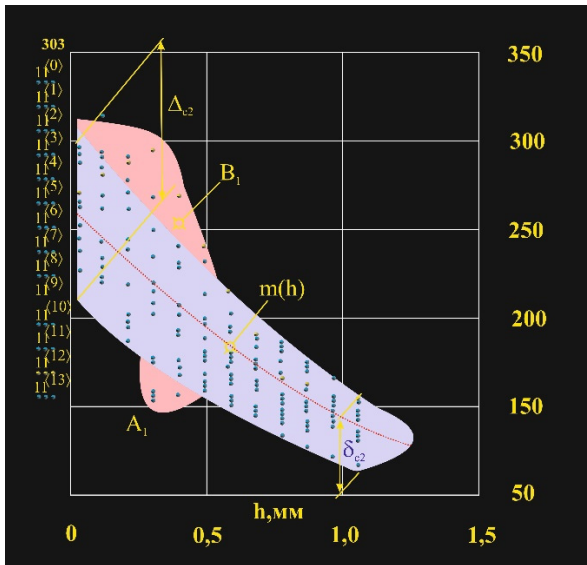


Рисунок 38 – Результаты измерений твердости материала детали из стали 45 по глубине обработанной поверхности

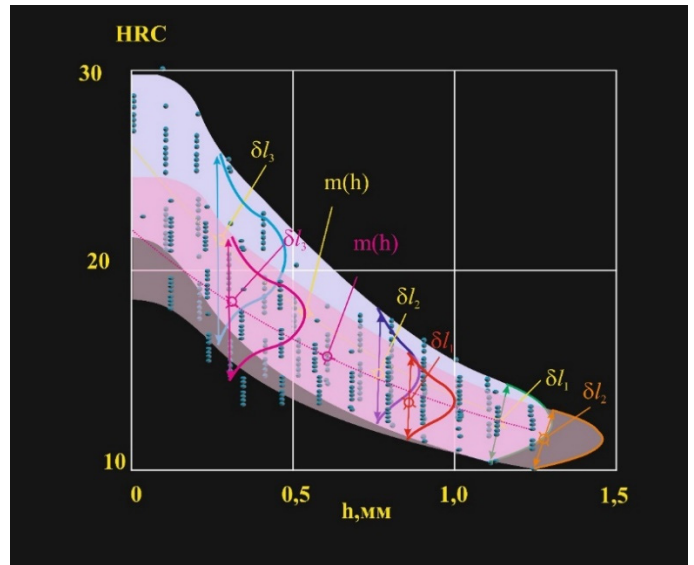


Рисунок 39 – Наличие случайных изменений твердости: голубая – зона после ТФР по жесткому циклу, розовая – после обработки с САУ ТП

В поверхностном слое обработанных поверхностей имеют место остаточные напряжения 200 МПа. Релаксация окончательных напряжений имеет место на глубине 10...200 мкм. Твердость поверхностного слоя в 1,3...1,5 раза выше твердости сердцевины заготовки. По глубине заготовки твердость уменьшается по экспоненциальному закону. На глубине 0,6...1,1 мм твердость соответствует твердости сердцевины заготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для обеспечения стабильности параметров качества обработки поверхностей при ТФР, операция рассмотрена как динамическая система. На основе системного подхода рассмотрена структура операции ТФР, сформулированы основные положения и принципы анализа операции. При системном анализе операция ТФР расчленена по функциональным признакам на подсистемы «Процесс резания» и «Технологическая система». Показано, что параметры ТС могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов. Важным показателем качества ТС обработки деталей является их стабильность, отсутствие стабильности при традиционных технологиях неизбежно приводит к разбросу показателей качества выпускаемой продукции. При форсированных технологических режимах в силу возрастания чувствительности ТС к возмущающим факторам наблюдается потеря стабильности ТС и ТП.

2. Выдвинуто научное положение о возможности обеспечения гарантированного качества изделий на операциях ТФР, подверженных влиянию возмущающих случайных факторов в условиях реализации граничных циклов, при наличии непрерывной диагностики состояния ТП и осуществлении динамической стабилизации параметров технологического цикла непосредственно в процессе обработки. Показано, что построение

предельных циклов возможно за счет построения более адекватных моделей процесса, учитывающих изменение состояния ТС с течением времени.

3. Обосновано научное положение, заключающееся в том, что, вводя дополнительные динамические приспособления в виде демпферов колебаний или вибрационного приспособления, можно целенаправленно изменять показатели волнистости поверхности при ТФР. Предложены прогрессивные методы ТФР деталей специальным инструментом в виде ТФД, режущая поверхность которого образована вращением клина с углом при вершине $75...80^\circ$ и радиусом кромки $0,2...0,5$ мм при окружной скорости инструмента $40...80$ м/с, охлаждением инструмента и местного нагрева заготовки, с вибрационным влиянием на процесс обработки путем использования специальных приспособлений и инструмента динамического действия, позволяющих целенаправленно изменять параметры колебательных процессов в динамической системе станка, а соответственно – параметры обработанной поверхности.

4. Доказана возможность реализации и эффективность предложенных методов ТФР, которые объединяют термофрикционную и вибрационную механическую обработку заготовок, обеспечивающую получение деталей с образованием регулярной волнистой поверхности, твердость которой в $1,3...1,5$ раза превышает твердость материала детали.

5. Выявлены особенности механизма формообразования поверхности при ТФР. В результате взаимных смещений заготовки и инструмента изменяется толщина слоя расплавленного металла. При этом возникают дополнительные силы давления, приводящие к увеличению потока расплавленного металла между заготовкой и кромкой инструмента. Интенсивность потока металла пропорциональна скорости относительного перемещения инструмента и заготовки. В результате на обработанной поверхности формируются наплывы (выступы), пропорциональные локальной скорости относительного движения инструмента и заготовки. При наличии в заготовке продольных пазов или вставок из разнородных материалов неровности возникают в поперечном направлении. Для описания формы поверхности рекомендуется использовать полигармонические функции двух переменных в виде произведения отрезков тригонометрических рядов.

6. Установлена специфическая особенность тепловыделения при ТФР, которая заключается в наличии основного источника тепла внутри объема слоя жидкого металла, осуществляющего напорное движение между поверхностью инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки и поверхностью стружки. Основное тепловыделение имеет место внутри объема жидкого слоя металла, где наблюдаются наибольшие значения градиента скорости. Доказано, что дополнительным фактором локализации термообразования является анизотропия параметров теплопроводности зоны резания, обусловленная разностью коэффициентов теплопроводности холодного, нагретого и жидкого металла. Анизотропия проявляется в виде существенно разных главных значений тензора теплопроводности и имеет своим следствием изменение направлений основных тепловых потоков с их ориентацией в сторону более холодных частей заготовки и инструмента, что приводит к повышению равномерности распределения температуры и теплоизоляции, а также локализации тонкого слоя расплавленного металла между инструментом и заготовкой, в котором и происходит основное тепловыделение и фазовые превращения.

7. Определено, что наибольшее влияние на силовые параметры процесса ТФР плоских поверхностей оказывают скорость подачи заготовки, окружная скорость инструмента, толщина срезаемого слоя и теплофизические свойства материалов

инструмента и заготовки. Найдены эмпирические зависимости для определения силовых параметров (P_z , P_y , P_x), которые рекомендуется использовать для необходимых инженерных расчетов. Показано, что процесс стружкообразования при ТФР протекает в зоне, начальные и конечные границы которой расположены на значительном расстоянии. В ходе перемещения металла через зону стружкообразования имеет место его последовательное упрочнение. В контактной зоне с передней и задней поверхностью инструмента формируется область контактных пластических деформаций с ярко выраженной текстурой.

8. Установлено, что диски для ТФР сталей обладают более высокой стойкостью по сравнению с обычным режущим инструментом, поскольку имеют диаметр 160...500 мм, а участок режущей кромки, находящийся в непосредственном контакте с обрабатываемой поверхностью, постоянно обновляется. При большой скорости вращения диска создается поток охлаждающего его воздуха. Предложены для дальнейшей разработки и реализации конструкции ТФД с подрезным резцом, устройства для съема нароста. Для рационального формирования стружки на цилиндрической поверхности инструмента рекомендуется выполнить лыски, фасонные выступы или винтовые канавки.

9. Создано инструментальное обеспечение процесса ТФР, реализующее предложенные концептуальные принципы обработки. При этом разработаны дисковые инструменты, обеспечивающие целенаправленное термическое воздействие на процесс обработки, заключающееся в охлаждении инструмента и рациональном теплоотводе. Разработаны специальные приспособления (вибрационный стол) и инструмент, обеспечивающие необходимые параметры вибраций в динамической системе станка путем использования специальных демпферов, средств формирования стружки и устройств для предотвращения образования нароста. Разработан ряд методов и устройств, обеспечивающих эффективную работу инструмента. В целях улучшения схода стружки на наружной поверхности инструмента рекомендуется выполнять винтовую канавку с шагом 0,8...1,5 мм при ширине канавки 0,5...0,8 мм. Для обеспечения периодического излома стружки на периферии диска рекомендуется выполнять клиновидные пазы. Для снижения динамических нагрузок на инструмент рекомендуется оснастить его демпфером, например ударного типа или демпфером в виде упругого кольца, покрытого эластомером, которое помещено в торцовой части инструмента и обеспечивает снижение шума и вибраций инструмента. Для стабилизации термического режима рекомендуется обеспечить его охлаждение путем выполнения в корпусе инструмента кольцевой полости, заполненной охлаждающей жидкостью или разместить внутри инструмента тепловые трубы для обеспечения эффективного отвода тепла из зоны резания.

10. Разработана единая методика расчета высокопроизводительных режимов ТФР на основе изучения закономерностей теплообразования, баланса тепловых потоков и особенностей теплопередачи в системе «инструмент – деталь», динамических колебательных процессов, определения взаимосвязей параметров процессов с показателями качества обработанной поверхности. Основу методики составляет разработанное формализованное математическое описание операции ТФР, позволяющее для любого момента времени при различных алгоритмах изменения режима определять фазовые координаты ТС (взаимное расположение инструмента и заготовки, параметры зоны контакта «инструмент – заготовка»), параметры качества обрабатываемой поверхности (шероховатость, размер, отклонения формы, физико-механическое состояние поверхностного слоя), выходные параметры процесса (скорость съема припуска, износ инструмента). Построены и формализованы в виде равенств и неравенств технические ограничения

факторов режима ТФР, определяемые возможностями станка, режущими свойствами ТФД, требованиями к точности обрабатываемой заготовки и качеству поверхностного слоя. Выбраны критерии оптимизации режима, которые записаны в виде функций от факторов режима ТФР. Построена математическая модель процесса ТФР и решена задача оптимизации цикла с использованием метода динамического программирования.

11. Разработана математическая модель процесса взаимодействия ТФД и заготовки, учитывающая влияние вариаций формы инструмента и ее спектральный состав, которая позволяет описывать отклонение состояния ТС от номинального режима в реальном масштабе времени. На основе разработанных моделей для операции ТФР и теории фильтрации Калмана-Бюсси синтезирована подсистема оценки вектора состояния с минимально достижимой среднеквадратической ошибкой (стохастический наблюдатель) и произведено определение его параметров.

12. Построенный стохастический наблюдатель Льюинбергера, который позволяет осуществлять непрерывную диагностику состояния операции ТФР с учетом стохастической природы, дает возможность получать информацию о состояниях ТП непосредственно в процессе обработки.

13. На основе разработанных математических моделей и получаемых оценок состояния синтезирована САУ ТП ТФР, применение которой позволяет стабилизировать режимы обработки и эффективно использовать предельные граничные циклы без потери стабильности показателей качества изделий.

14. Результаты исследований использованы при внедрении способа ТФР сталей. Проведенные испытания подтвердили правильность результатов теоретических и экспериментальных исследований и позволили сделать выводы об их промышленной эффективности. Внедрение обработки плоскостей в производство уменьшает трудоемкость операций, стоимость режущего инструмента и расход электроэнергии. Основные научно-технические результаты работы внедрены в производство, чем подтверждена эффективность разработанных технологических основ обеспечения качества и повышения стабильности процессов ТФР сталей. При промышленном внедрении были использованы рекомендации по выбору температур нагрева, устройства для получения переменной подачи и устройства для предотвращения наплывов. Внедрение способов обработки производилось в ООО «Донбасс-Сервис» (г. Луганск) с годовым экономическим эффектом от внедрения 1885000 руб.; ООО «Локомотив Сервис Ростов» (г. Донецк, Ростовская область) с годовым экономическим эффектом от внедрения 2440000 руб.; на АО «Керченский металлургический завод» (г. Керчь) с годовым экономическим эффектом от внедрения 4758900 руб.; ООО «ПК ТпЮГ» (г. Симферополь) с годовым экономическим эффектом от внедрения 3595420 руб.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК

1. Братан, С.М. Моделирование процесса термофрикционного резания металлов пилами трения / С.М. Братан, Н.И. Покинтелица, Ч.Ф. Якубов, А.С. Часовитина, М.И. Братан // Научно-технические исследования в машиностроении, 2026. – № 6 (180). – С. 3 – 11.

2. Покинтелица, Н.И. Повышение качества обработки на операциях термофрикционного резания за счет оптимальной стохастической диагностики и управления съемом припуска / Н.И. Покинтелица, С.М. Братан, А.С. Часовитина, Ч. Ф. Якубов // Научно-технические исследования в машиностроении, 2025. – № 8 (170). – С. 21 – 30.

3. Якубов, Ч.Ф. Методика математического описания оценки геометрии инструмента с учетом теплофизических параметров / Ч.Ф. Якубов, С.М. Братан, Н.И. Покинтелица, А.С. Часовитина // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2024. – № 2(364). – С. 18 – 23.
4. Якубов, Ч.Ф. Моделирование процессов теплопередачи при термофрикционном резании в заготовках из конструкционных сталей / Ч.Ф. Якубов, Н.И. Покинтелица, С.М. Братан, А.С. Часовитина // Научные технологии в машиностроении. – 2024. – № 10(160). – С. 19 – 26.
5. Якубов Ч.Ф. Исследование и оптимизация динамической системы «инструмент-прокат» на операциях фрикционно-абразивного резания / Ч.Ф. Якубов, В.В. Скаун, Е.А. Левченко // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, 2025. – № 2(88). – С. 403 – 409.
6. Покинтелица, Н.И. Методология обеспечения повышения эффективности фрикционного формообразования поверхностей / Н.И. Покинтелица, М.И. Братан, Ч.Ф. Якубов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 1(79). – С. 252 – 260.
7. Якубов, Ч.Ф. Теоретический анализ рабочих процессов термофрикционной обработки деталей дисковым инструментом / Ч.Ф. Якубов, Н.И. Покинтелица, С.М. Братан // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 4(82). – С. 235 – 244.
8. Якубов, Ч.Ф. Влияние контактно-фрикционного взаимодействия при резании на качество обработки / Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким // Вестник машиностроения. – 2020. – № 3. – С. 73 – 77.
9. Якубов, Ч.Ф. Математическое моделирование деформационных процессов стружкообразования при резании металлов / Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким, Е.В. Самар, // Технология машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 53 – 62.
10. Якубов, Ч.Ф. Диссипативные процессы контактного взаимодействия и стружкообразования при резании металлов / Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким, Е.В. Самар // Вестник машиностроения. – 2019. – № 7. – С. 65 – 69.
11. Ким, В.А. Анализ плоскости сдвига при стружкообразовании в процессе резания. Часть I / В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий, Ч.Ф. Якубов // Металлообработка. – 2019. – № 1(109). – С. 9 – 14.
12. Ким, В.А. Математическое моделирование деформационно-динамических процессов резания металлов / В.А. Ким, Е.Б. Щелкунов, Е.В. Самар, Ч.Ф. Якубов // Технология машиностроения. – 2019. – № 6. – С. 50-57.
13. Ким, В.А. Анализ плоскости сдвига при стружкообразовании в процессе резания. Часть II / В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий, Ч.Ф. Якубов // Металлообработка. – 2019. – № 1(109). – С. 15 – 21.
14. Якубов, Ф.Я. Термодинамика процесса пластической деформации при резании материалов / Ф.Я. Якубов, Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2019. – № 4(66). – С. 349 – 359.
15. Якубов, Ч.Ф. Диссипативная структура контактно-фрикционного взаимодействия при резании металлов / Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018. – Т. 22. – № 12(143). – С. 35 – 45.
16. Ким, В.А. Влияние микроструктуры конструкционных и легированных сталей на износостойкость / В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий, Ч.Ф. Якубов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 1(157). – С. 7 – 11.

17. Ким, В.А. Адгезионные процессы контактного взаимодействия при резании материалов / В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий, Е.В. Самар, Ч.Ф. Якубов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2018. – Т. 1. – № 1(33). – С. 66 – 75.

18. Ким, В.А. Управление триботехническими процессами контактного взаимодействия при резании / В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий, Е.В. Самар, Ч.Ф. Якубов // Металлообработка. – 2017. – № 3(99). – С. 2 – 8.

19. Верхотуров, А.Д. Роль воздуха в контактных процессах резания металлов / А.Д. Верхотуров, Ф.Я. Якубов, В.А. Ким, Л.А. Коневцов, Ч.Ф. Якубов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – Комсомольск-на-Амуре: КНАГТУ, 2014. – Т. 1. – № 3(19). – С. 64 – 72.

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, индексируемых в международной наукометрической базе Scopus

20. Братан, С.М. Повышение качества термофрикционной обработки путем введения в технологическую систему дополнительных демпфирующих приспособлений / С.М. Братан, Н.И. Покинтелица, А.О. Харченко, Ч.Ф. Якубов // Черные металлы. – 2023. – № 12. – С. 96 – 104.

21. Yakubov, C. Stochastic diagnostics of tool and workpiece interaction / S. Bratan, M. Saga, B. Yakimovich, N. Pokintelitsa, C. Yakubov / Management Systems in Production Engineering, 2025, 33(2), pp. 39 – 45.

22. Братан, С.М. Диссипативные процессы контактно-фрикционного взаимодействия при термофрикционном резании черных металлов / С.М. Братан, Н.И. Покинтелица, А.С. Часовитина, Ч.Ф. Якубов // Черные металлы, 2026. – № 4. – С. 44 – 51.

Статьи, опубликованные в других изданиях

23. Якубов, Ч.Ф. Исследование адгезионно-активных поверхностных структур в быстрорежущей стали Р6М5 / Ч.Ф. Якубов, В.А. Ким, Е.Б. Щелкунов, Е.В. Самар // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 12. – С. 40 – 44.

Патенты

24. Патент 231132 Российская Федерация, МПК В23Д 23/10. Режущий диск с винтовыми канавками / Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Скакун В.В.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117416; заявл. 24.06.2024; опубл. 13.01.2025, Бюл. № 2.

25. Патент 231231 Российская Федерация, МПК В23Д 23/10. Режущий диск с шариковым ударным демпфером / Покинтелица Н.И., Якубов Ч.Ф., Братан С.М., Скакун В.В.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117413; заявл. 24.06.2024; опубл. 16.01.2025, Бюл. № 2.

26. Патент 2834739 Российская Федерация, МПК В24Д 5/10, В24Д 7/10. Диск для фрикционного резания с системой охлаждения / Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Скакун В.В.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117439; заявл. 24.06.2024; опубл. 13.02.2025, Бюл. № 5.

27. Патент 228815 Российская Федерация, МПК В23Д 23/10. Режущий диск с приспособлениями для удаления нароста / Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Скакун В.В., Графова А.Е.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117415; заявл. 24.06.2024; опубл. 11.09.2024, Бюл. № 26.

28. Патент 228822 Российская Федерация, МПК В23D 23/10. Режущий диск с теплоотводящими устройствами / Покинтелица Н.И., Якубов Ч.Ф., Братан С.М., Скакун В.В.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117422; заявл. 24.06.2024; опубл. 11.09.2024, Бюл. № 26.

29. Патент 228823 Российская Федерация, МПК В23D 23/10. Режущий диск с ударными демпферами колебаний / Покинтелица Н.И., Якубов Ч.Ф., Братан С.М., Скакун В.В., Братан М.И.; заявитель и патентообладатель – авторы. – № 2024117414; заявл. 24.06.2024; опубл. 11.09.2024, Бюл. № 26.

30. Патент 243565 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Скакун В.В., Покинтелица Н.И., Братан С.М., Джемалыдинов Р.М., Светличная О.В.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025130064; заявл. 31.10.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14.

31. Патент 243575 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Скакун В.В., Братан С.М., Покинтелица Н.И., Джемилов Э.Ш., Теминдаров И.Э.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025131083; заявл. 10.11.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14.

32. Патент 243567 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Скакун В.В., Братан С.М., Покинтелица Н.И., Ваниев Э.Р., Теминдаров И.Э.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025131089; заявл. 10.11.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14. – 1 с.

33. Патент 243568 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Покинтелица Н.И., Скакун В.В., Братан С.М., Джемалыдинов Р.М., Братан М.И.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025131096; заявл. 10.11.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14.

34. Патент 243570 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Скакун В.В., Братан С.М., Покинтелица Н.И., Джемалыдинов Р.М., Графова А.Е.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025131141; заявл. 11.11.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14.

35. Патент 243572 Российская Федерация, МПК В24D 99/00. Комбинированный инструмент для фрикционно-абразивного резания / Якубов Ч.Ф., Скакун В.В., Братан С.М., Покинтелица Н.И., Джемалыдинов Р.М., Часовитина А.С.; заявитель и патентообладатель – ГБОУВО РК «КИПУ имени Февзи Якубова». – № 2025131141; заявл. 11.11.2025; опубл. 19.05.2026, Бюл. № 14.

Якубов Чингиз Февзиевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА И ПОВЫШЕНИЯ СТАБИЛЬНОСТИ
ПРОЦЕССОВ ТЕРМОФРИКЦИОННОГО РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ**

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.4.393.01 ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (протокол № 50 от 29.05.2026 г.) Формат 60×84 1/16. Усл. печ. лист. 2,0. Бумага офсетная.

Гарнитура TimesNewRoman. Отпечатано на ризографе. Тираж 120 экз. Заказ № 119. ИП Хотеева Л.В., 295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, д.8. Свидетельство о государственной регистрации серии 91 №000206511 от 23.12.2015 г. Тел. +7(978)8342579, v.buber@mail.ru