

*На правах рукописи*



Нагоркин Максим Николаевич

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ШЕРОХОВАТОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТАМИ  
ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Брянск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «БГТУ»)

Научный консультант: Тотай Анатолий Васильевич  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Бутенко Виктор Иванович  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология машиностроения»  
ФГБОУ ВО «Донской государственной  
технической университет»

Отений Ярослав Николаевич  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Технология машиностроения  
и прикладная механика» Камышинского  
технологического института (филиал)  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет»

Афонин Андрей Николаевич  
доктор технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Информационные и  
робототехнические системы»  
ФГАОУ ВО «Белгородский государственный  
национальный исследовательский университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный  
технический университет им. Т. Ф. Горбачева»

Защита состоится 20 февраля 2020 года в 15<sup>00</sup> часов на заседании объединённого диссертационного совета Д999.155.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», по адресу: 241035, г. Брянск, ул. Харьковская, д. 10 б, ауд. Б 101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» и на сайте:

<https://www.tu-bryansk.ru/mainpage/dissertatsii/nagorkin-maksim-nikolaevich>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

О. Н. Кириллов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Применение новых технологий металлообработки связано с решением задач определения их возможностей по формированию требуемых эксплуатационных характеристик поверхностей деталей. Анализ научной литературы показал, что в исследованиях влияния на формирование параметров качества и эксплуатационных свойств деталей машин из конструкционных сталей и чугуна ряда методов обработки, таких как точение или фрезерование с применением синтетических сверхтвёрдых материалов (ССТМ), отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием (ОУО ППД), в частности, алмазное выглаживание (АВ) и др., недостаточно рассмотрены вопросы параметрической надёжности технологических систем.

Для технолога значительный интерес представляет возможность технологических систем (ТС) обеспечить требуемые показатели качества обрабатываемых поверхностей деталей с максимальной или заданной надёжностью. В определённых условиях может оказаться, что функционирующая ТС будет заведомо неработоспособной, если она не в состоянии обеспечить требуемую гамму параметров в заданных диапазонах их изменения с высокой вероятностью. ГОСТ 27.202-83 регламентирует методы оценки надёжности ТС исходя из критериев отказов по параметрам качества изготавливаемой продукции. В настоящее время в научной и справочной литературе имеется весьма ограниченная информация по параметрической надёжности ТС формирования параметров качества поверхностей чистовыми и финишными методами обработки, в том числе инструментами с ССТМ.

В связи с этим при решении задач технологического обеспечения заданных параметров качества поверхностей деталей машин и их эксплуатационных свойств безусловную **актуальность** приобретает проблема исследования возможностей чистовых и финишных ТС лезвийной обработки инструментами с ССТМ и ППД АВ (наряду с другими ТС) и определения их параметрической надёжности по требуемым показателям качества инженерными методами.

**Степень разработанности научной проблемы.** Анализ применяемых на практике подходов к реализации технологических процессов чистовой и финишной обработки деталей, литературных источников и нормативно-технической документации показал, что:

- недостаточно регламентированы требования к назначению технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей в технологической документации;
- отсутствуют единая научно-обоснованная методология и инженерные методы определения параметрической надёжности ТС чистовой и финишной обработки деталей по параметрам шероховатости и износостойкости обработанных поверхностей;
- отсутствуют рекомендации по реализации технологий обработки поверхностей деталей, в том числе в компьютеризированных ТС с возможностью управления изменением параметров качества в пределах технологического перехода, а также метрологического обеспечения.

Это позволяет констатировать актуальность и необходимость дальнейших исследований в этом направлении.

**Цель работы:** решение проблемы исследования и повышения надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости и износостойкости поверхностей деталей при чистовой и финишной обработке инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов инженерными методами, разработанными на основе результатов технологических исследований.

**В работе поставлены следующие задачи:**

1. Разработать теоретические основы назначения в технологической документации интервальных значений параметров шероховатости поверхностей деталей, с учётом случайности их формирования, обеспечивающие выполнение конструкторских требований к ним с максимальной надёжностью.

2. Осуществить дальнейшую разработку научных основ методологии определения параметрической надёжности технологических систем чистовой и финишной обработки по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей с применением методов имитационного моделирования.

3. Разработать алгоритмы и прикладное программное обеспечение для определения параметрической надёжности технологических систем методом имитационного моделирования на основе построения физико-статистических моделей формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин как статистических основ современной методологии научных исследований в технологии машиностроения.

4. Разработать метрологическое обеспечение экспериментальных исследований на основе модернизации и компьютеризации отечественных средств измерений геометрических параметров качества и металлографического анализа поверхностей деталей в соответствии с политикой импортозамещения.

5. Установить влияние динамики процесса обработки ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости одноинденторными инструментами упругого действия на стабильность формирования геометрических параметров качества и разработать критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД, характеризующей возможность обеспечения регламентируемых параметров шероховатости в допустимых пределах варьирования с максимальной надёжностью.

6. Определить для ТС лезвийной обработки и ОУО ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей инструментами, оснащёнными ССТМ, параметрическую надёжность формирования показателей качества и триботехнических характеристик поверхностей.

7. Реализовать ТС комбинированной обработки поверхностей деталей на основе применения чистовых методов лезвийной обработки инструментом с ССТМ, нанесения антифрикционных мягких медесодержащих приработочных плёнок и финишной ОУО ППД алмазным выглаживанием и определить параметрическую надёжность ТС по параметрам шероховатости и триботехнических свойств обработанных поверхностей деталей.

8. Разработать новые технологии формирования микрорельефов на по-

верхностях деталей обработкой ППД программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ, повышающие их триботехнические характеристики.

9. Создать классификацию видов нестабильных эксплуатационных воздействий на поверхности деталей в типовых соединениях трения скольжения по пространственным и временным критериям и разработать принципы и технологические средства управления процессом формирования параметров качества, закономерно изменяющихся по поверхности детали, с целью обеспечения постоянства требуемых параметров её износостойкости при переменных условиях эксплуатации, обусловленных видом нестабильности внешних воздействий.

10. На основе современной методологии научных технологических исследований разработать инженерный метод определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей, базирующийся на программном методе экспресс-диагностики ТС (ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производственных экспериментально-технологических лабораторий.

**Объектом исследования** являются чистовые и финишные стадии технологических процессов обработки инструментами, оснащёнными ССТМ, плоских и цилиндрических поверхностей деталей, работающих в соединениях трения скольжения.

**Предмет исследований.** Взаимосвязи, закономерности и параметрическая надёжность процессов технологического обеспечения геометрических параметров качества и износостойкости поверхностей деталей машин на стадиях чистовой и финишной обработки лезвийными и упрочняющими инструментами, оснащёнными ССТМ.

**Научная новизна работы.** Получено решение проблемы исследования и повышения параметрической надёжности ТС по обеспечению параметров шероховатости и эксплуатационных свойств (на примере износостойкости) поверхностей деталей при чистовой и финишной обработке инструментами, оснащёнными ССТМ, которое позволило получить следующие результаты:

- разработана научно-обоснованная методология определения параметрической надёжности ТС механической обработки деталей по параметрам качества поверхностей методом имитационного моделирования;

- разработаны модели влияния динамических свойств одноинденторных инструментов упругого действия при обработке ППД плоских и цилиндрических поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на формирование геометрических параметров качества и критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД с учётом технологических факторов и конструктивных параметров инструмента;

- разработаны модели нестабильности эксплуатационных воздействий (нагрузка  $P$ , скорость относительного скольжения  $V$ ) на поверхности трибоэлементов по характеру изменений во времени и в пространстве, позволяющие обосновать требуемую закономерность изменения значений параметров качества по поверхности детали, что позволит обеспечить её равномерный износ;

- разработаны модели и принципы программного управления процессом

формирования параметров качества, значения которых закономерно изменяются по поверхности детали в соответствии с характером изменений эксплуатационных нагрузок, что позволит обеспечить равномерный износ поверхности.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке методологической основы для исследования и повышения параметрической надёжности технологических систем, для которой:

- теоретически обоснована методология назначения технологических значений параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей, обеспечивающая выполнение требований конструкторской документации с заданной надёжностью;

- разработаны теоретические основы оценки параметрической надёжности ТС механической обработки по обеспечению параметров качества поверхностей деталей имитационным моделированием с построением физико-статистических моделей формирования параметров качества;

- разработано теоретическое обоснование необходимости управления формированием закономерно изменяющихся параметров качества и эксплуатационных свойств поверхности детали для обеспечения её равномерного изнашивания при изменяющихся эксплуатационных нагрузках на основе моделей контактных взаимодействий поверхностей деталей типовых соединений трения-скольжения;

- разработаны теоретические основы построения моделей изменения управляющих факторов в процессе обработки на основе физико-статистического моделирования процессов формирования параметров качества, в том числе с учётом механизма технологического наследования, позволяющие реализовать программное управление в ТС с ЧПУ обеспечением закономерно изменяющихся параметров качества поверхностного слоя.

**Практическая значимость работы** заключается:

- в реализации на основе полученных физико-статистических моделей возможности технологического управления геометрическими параметрами качества поверхностей деталей и их триботехническими характеристиками чистой обработкой резанием с последующей финишной обработкой ППД инструментами, оснащёнными ССТМ, как без, так и с модификацией поверхности мягкими приработочными плёнками;

- в возможности использования с целью выбора ТС из ряда альтернативных комплекса результатов исследований параметрической надёжности ТС лезвийной обработки и обработки ППД инструментами с ССТМ и комбинированной антифрикционной обработки по параметрам шероховатости плоских и цилиндрических поверхностей и износостойкости цилиндрических поверхностей деталей;

- в создании компьютеризированных измерительных систем оценки геометрических параметров качества поверхностей деталей и системы металлографического анализа;

- в реализации новых технологий формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в ТС с ЧПУ;

– в реализации технологии формирования закономерно изменяющихся параметров качества по поверхности детали, с целью обеспечения её равномерного изнашивания при действии изменяющихся эксплуатационных нагрузок.

– в разработке и реализации программного метода экспресс-диагностики ТС по параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей, включающей этапы планирования эксперимента, обработки деталей, измерения параметров качества и эксплуатационных свойств, построения моделей их формирования и оценки параметрической надёжности.

Отдельные результаты диссертационной работы внедрены в ООО НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения», ЗАО «Клондаик электроникс», используются в учебном процессе в Брянском государственном техническом университете.

Часть результатов диссертационной работы получена при проведении научно-исследовательских работ при финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ по фундаментальным исследованиям в области машиностроения, выполненных в Брянском государственном техническом университете (Т00-6.3-360, Т02-06.3-579).

**Методы исследований.** Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений технологии машиностроения, инженерии поверхности, теории надёжности, теории вероятностей и математической статистики, теории математического моделирования, теории автоматического управления. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных условиях с применением станочного оборудования и современных измерительных систем с использованием методов планирования эксперимента и корреляционного анализа. Обработка результатов экспериментальных исследований проводилась с использованием как стандартных, так и авторских программ.

**Положения, выносимые на защиту,** включают:

1. Теоретические и методологические основы определения параметрической надёжности технологических систем механической обработки по параметрам качества обрабатываемых поверхностей деталей.

2. Теоретические основы назначения технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей в технологической документации, обеспечивающие выполнение требований конструкторской документации с заданной надёжностью.

3. Теоретическое обоснование влияния динамики процесса обработки ППД одноинденторными инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на формирование геометрических параметров качества, подтверждённые результатами физического моделирования.

4. Обоснование понятия технологической устойчивости процессов ОУО ППД поверхностей деталей инструментами упругого действия и критерии её оценки из условий безотрывности индентора от обрабатываемой поверхности.

5. Комплекс результатов исследований параметрической надёжности ТС лезвийной обработки (торцевое фрезерование, точение) и обработки ППД инст-

рументами, оснащёнными ССТМ, плоских и цилиндрических поверхностей деталей по геометрическим параметрам качества.

6. Комплекс результатов исследований параметрической надёжности ТС обеспечения параметров износостойкости цилиндрических поверхностей деталей машин на основе комбинированной антифрикционной обработки, включая лезвийную обработку и ППД инструментами, оснащёнными ССТМ.

7. Концепцию программного управления процессом формирования закономерно изменяющихся значений параметров качества по поверхности детали, для обеспечения её равномерного изнашивания при действии изменяющихся эксплуатационных нагрузок.

8. Концепцию оценки параметрической надёжности ТС, базирующейся на программном методе экспресс-диагностики ТС по параметрам качества и эксплуатационных свойств поверхностей обрабатываемых деталей.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта специальности 05.02.08 – «Технология машиностроения»: п. 2 «Технологические процессы, ... , обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости», п. 3 «Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей...», п. 7 «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

**Степень достоверности результатов исследований** подтверждается адекватностью математических моделей, построенных с использованием реальных результатов исследований, удовлетворительным совпадением теоретических положений с результатами моделирования исследуемых процессов, а также согласованностью полученных результатов с исследованиями других авторов.

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы были представлены и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: международная научно-техническая конференция «Прогрессивные технологии и оборудование в машиностроении и металлургии» (г. Липецк, ЛГТУ, 2006 г.); международная научно-техническая конференция «Автоматизация технологических процессов и производственный контроль» (г. Тольятти, ТГУ, 2006 г.); международный научный симпозиум «Гидродинамическая теория смазки – 120 лет» (г. Орел, 2006 г.); VI международная научно-техническая конференция «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (г. Брянск, 2008 г.); III международная научно-техническая конференция «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения» (г. Брянск, БГТУ, 2011 г.); IV международная научно-техническая конференция «Научоёмкие технологии в авиадвигателестроении» (г. Рыбинск, РГАТУ, 2012 г.); VII международная научно-техническая конференция «Проблемы обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности изделий машиностроения и авиадвигателестроения» (г. Брянск, БГТУ, 2015 г.); VIII международная научно-техническая конференция «Научоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (г. Москва, МАДИ, 2016 г.); международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севасто-



поль, 2016 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2016 (г. Челябинск, 2016); международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития машиностроения» (г. Липецк, ЛГТУ, 2016); X Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, ТПУ, 2016); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2017 (г. Санкт-Петербург, 2017); международный научный симпозиум технологов-машиностроителей «Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей» (г. Ростов-наДону, ДГТУ, 2017 г.); Международная научно-техническая конференция «Пром-Инжиниринг» ICIE-2018 (г. Москва, МПУ 2018); всероссийская научно-техническая конференция «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» (г. Курск, ЮЗГУ, 2019).

Диссертационная работа заслушана в полном объеме на заседании научно-технической секции международной научно-технической конференции «МК-16-М» в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет» (г. Липецк, 2016 г.); на научном семинаре «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и их соединений», посвященному 90-летию со дня рождения Рыжова Э. В. в ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск, 2018 г.); на пленарном заседании научно-технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем» в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (г. Курск, 2019 г.); заседании кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (г. Воронеж, 2019 г.); на научном симпозиуме технологов-машиностроителей «Фундаментальные основы физики, химии, и динамики наукоемких технологических систем формообразования и сборки изделий» (п. Дивногорское, 2019 г.); на заседании межкафедрального научно-технического семинара учебно-научного технологического института ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск, 2019 г.).

**Личный вклад автора.** В диссертации представлены результаты исследований, основная часть которых выполнена лично автором, а часть в соавторстве с сотрудниками кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет». С участием соавторов проводились отдельные экспериментальные исследования, разрабатывались компьютерные программы, предложены отдельные конструкторско-технологические решения по диагностике ТС.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 93 научных работы, в том числе 19 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 6 статей в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе Scopus, 4 монографии, 62 публикации в материалах научных конференций, 2 отчета по НИР.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы, включающего 349 наименований, 20 приложений. Диссертация выполнена на 374 страницах, содержит 144 рисунка, 18 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цель и задачи работы, изложены научная новизна и практическая значимость результатов. Сформулированы положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** на основе анализа работ отечественных и зарубежных учёных выявлены современные научные и практические достижения в области технологического обеспечения качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей машин и надежности ТС металлообработки. Значительный вклад в развитие этого направления науки внесли Аверченков В.И., Алексеев П.Г., Бабичев Ю.П., Базров Б.М., Безъязычный В.Ф., Блюменштейн В.Ю., Бржозовский Б.М., Бутенко В.И., Васильев А.С., Витенберг Ю.Р., Вороненко В.П., Гаркунов Д.Н., Горленко О.А., Гречишников В.А., Григорьев С.Н., Дальский А.М., Добычин Н.М., Елизаветин М.А., Киричек А.В., Клименко С.А., Комбалов В.С., Костецкий Б.И., Крагельский И.В., Макаров В.Ф., Маталин А.А., Михин Н.М., Одинцов Л.Г., Отений Я.Н., Папшев Д.Д., Проников А.С., Решетов Д.Н., Рыжов Э.В., Смелянский В.М., Смоленцев В.П., Соколовский А.П., Старков В.К., Сулима А.М., Суслов А.Г., Торбило В.М., Тотай А.В., Фёдоров В.П., Хворостухин Л.А., Шнейдер Ю.Г., Ящерицин П.И., Боуден Ф.П., Тейбор Д., Хисакадо Т. и др. исследователи, представляющие отечественные и зарубежные научные технологические школы.

Анализ показал, что формирование параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностного слоя деталей осуществляется, в основном, на чистовых и финишных операциях технологического процесса обработки, в том числе лезвийным методом обработки инструментами с ССТМ, ОУО ППД (АВ, накатывание) и др. Установлено, что важная роль при этом отводится комбинированным методам обработки с применением модификация поверхностей нанесением различных покрытий с последующей обработкой ППД.

Во многих работах отмечено, что причины отказов изделий часто связаны с несовершенством технологии их производства: необоснованностью технологических условий, недостаточной надёжностью технологических систем механической обработки и др. В связи с этим, одним из важнейших критериев выбора возможных методов обработки является параметрическая надёжность ТС.

Надёжность ТС механической обработки поверхностей деталей машин можно оценить методами диагностирования, точность которых зависит от степени автоматизации, учёта факторов влияющих на процесс формирования параметров качества и эксплуатационных свойств при обработке и др.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют стандартизированные методы диагностирования ТС, позволяющие определить её возможности по обеспечению требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств и параметрическую надёжность.

При оценке факторов, влияющих на формирование параметров качества поверхностей деталей при обработке методами ППД, обычно не учитываются динамические характеристики процессов взаимодействия деформирующих элементов инструментов с обрабатываемой поверхностью. Это связано с недос-

татком исследований динамики процессов ППД различными методами.

Важным при определении факторов, влияющих на формирование эксплуатационных свойств поверхностей деталей, является учёт характера действующих нагрузок при их работе в соединениях трения-скольжения. Это, в свою очередь, позволяет назначить режимы обработки, позволяющие снизить влияние нестабильных эксплуатационных нагрузок на неравномерность износа, что повышает надёжность соединений трибоэлементов. Анализ показал, что практически отсутствуют исследования в этом направлении.

Таким образом, обеспечение высокой надёжности формирования требуемых параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей зависит от надёжности ТС, выбор которой зависит от достоверности информации о её технологических возможностях и обоснованности выбранных значений факторов обработки. На основе этого были определены цель исследований и задачи, решение которых необходимо для её достижения.

Во **второй главе** рассматриваются теоретические и методологические основы определения параметрической надёжности ТС механической обработки по параметрам качества поверхностей деталей.

В ходе конструкторской подготовки производства в большинстве случаев на чертеже детали регламентируются конструкторские значения параметров качества поверхности детали, в том числе параметры шероховатости  $R_{iK}$ , для которых обычно указывается наибольшее значение, а затем это же значение указывается в технологической документации на изготовление детали.

Конструкторское значение параметра шероховатости  $R_{iK}$  – детерминированная постоянная величина, а его технологическое значение  $R_{iT}$  – величина случайная, имеющая соответствующий закон распределения и статистические характеристики. Вероятность точного обеспечения  $R_{iT} = R_{iK}$  стремится к нулю, поэтому необходимо задавать её интервальные значения которые должны быть технологически обеспечены в процессе обработки с максимальной надёжностью. В связи с этим разработан алгоритм регламентации параметров шероховатости поверхностей деталей, отвечающий требованиям ГОСТ 2.309-73, позволяющий устанавливать технологу допустимые границы значений обеспечиваемого параметра шероховатости в технологической документации для повышения вероятности обеспечения требований конструкторской документации.

В соответствии с ГОСТ 27.004-85 для любой ТС характерны параметрические отказы, при которых сохраняется её функционирование, но происходит выход значений одного или нескольких параметров качества обрабатываемых поверхностей за пределы, установленные в нормативно-технической документации. Таким образом, параметрическая надёжность ТС определяется как вероятность выполнения задания по регламентируемому параметру качества продукции в заданном интервале  $Y \in (\pm \delta \bar{Y})$ , обеспечиваемому при выполнении техпроцесса или операции (ГОСТ 27.202-83):

$$P_i(t) = P\{x_{ni} \leq x_i(t) \leq x_{gi}\} = P\{Y \in (\bar{Y} - \delta \bar{Y}; \bar{Y} + \delta \bar{Y})\}, \quad (1)$$

где  $x_i(t)$ ,  $x_{gi}$ ,  $x_{ni}$  – соответственно, фактическое, верхнее и нижнее допустимые значения  $i$ -го параметра качества;  $\bar{Y}$  – средняя величина параметра качества;  $\delta$  –

допускаемая относительная величина отклонения регламентируемого параметра качества  $Y$  от заданного конструктором среднего значения  $\bar{Y}$  ( $0 \leq \delta \leq 1$ ).

В основу оценки показателей параметрической надёжности ТС, в качестве которых рассматривались вероятности выполнения заданий (1) по регламентируемому параметру качества, положен физико-статистический подход, базирующийся на построении физико-статистической модели технологического процесса, связывающей факторы, учитывающие условия обработки, с параметрами качества поверхности обработанной детали.

Для оценки показателей надёжности ТС по параметрам качества обрабатываемых деталей необходимо:

1. Методами регрессионного анализа построить статистические модели функции ТС, которые можно представить в виде полиномиальной (аддитивной) модели (2) или функции Кобба-Дугласа (мультипликативная модель) (3):

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (2)$$

$$Y_i = \beta_0 \cdot X_1^{\beta_1} \cdot X_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot X_k^{\beta_k}. \quad (3)$$

где  $Y_i$  –  $i$ -ый параметр качества поверхности детали или эксплуатационных свойств после обработки (рассматриваются параметры шероховатости, отклонений от круглости и износостойкости);  $X_i$  –  $i$ -ый фактор технологического процесса;  $\beta_0, \beta_i$  – истинные значения коэффициентов регрессии.

2. Используя соответствующие алгоритмы и программное обеспечение, реализовать машинные эксперименты в выбранной области факторного пространства по схеме Монте-Карло и проанализировать с целью оценки вероятностных характеристик выходные величины моделируемой ТС. При этом в случае нормального распределения решается задача вычисления  $N$  значений модели функции ТС  $Y_i = f(X_1, X_2, \dots, X_k; b_0, b_1, \dots, b_k; S\{\beta_0\}, S\{\beta_1\}, \dots, S\{\beta_k\})$ , такой, что

$$Y_i = b_0 \prod_{j=1}^k X_j^{RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})}, \quad (4)$$

где  $X_i$  – значения входных параметров технологического процесса;  $b_i$  – математические ожидания коэффициентов модели (регрессии);  $S\{\beta_i\}$  – среднеквадратические отклонения коэффициентов модели (регрессии);  $RND N_i(b_i, S\{\beta_i\})$  – нормально распределенное случайное число.

3. Спрогнозировать показатели параметрической надёжности технологического обеспечения параметров качества поверхностного слоя (ПКПС) или параметров эксплуатационных свойств (ПЭС) обрабатываемой детали для данной ТС. Параметрическая надёжность ТС определяется как вероятность  $P$  выполнения задания по регламентируемым параметрам качества  $Y_i$  обрабатываемой поверхности в интервале  $(Y_{i \min}, Y_{i \max})$  по зависимостям:

$$P\{Y_{i \min} < Y_i < Y_{i \max}\} = \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right) - \Phi\left(\frac{Y_{i \min} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right), \quad (5)$$

$$P\{Y_i < Y_{i \max}\} = 0,5 + \Phi\left(\frac{Y_{i \max} - M\{\tilde{Y}_i\}}{S\{\tilde{Y}_i\}}\right). \quad (6)$$

Зависимость (5) используется в случае двухстороннего ограничения допуска параметра  $Y_i$ , а (6) – в случае одностороннего ограничения допуска.

Для определения параметрической надёжности ТС на основе имитационного моделирования было разработано специальное программное обеспечение, описание которого и алгоритмы расчёта представлены в главе 2 диссертации.

В третьей главе представлена методика проведения экспериментальных исследований. Решение поставленных задач осуществлялось на основе комплексного подхода к экспериментальным исследованиям ТС обеспечения параметров шероховатости и износостойкости поверхностей деталей (рисунок 1).

При планировании эксперимента выбираются входные факторы ТС в виде

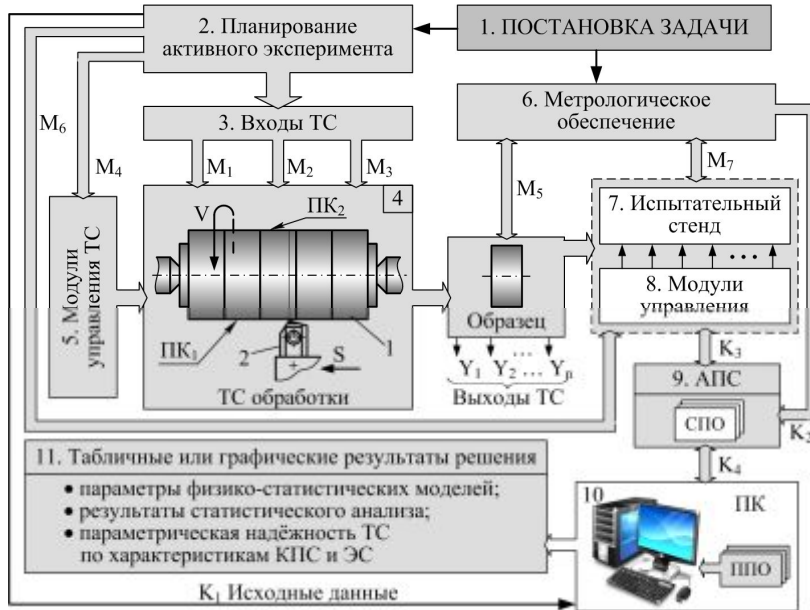


Рисунок 1 – Структурная схема комплексного подхода к экспериментальным исследованиям ТС металлообработки

тательные стенды для исследования ЭС поверхностей деталей, аппаратно-программные средства (АПС), модули управления ТС и испытательными стендами. Каналами передачи информации являются:  $K_1$  – исходные данные активного эксперимента;  $K_2$  – результаты измерений параметров качества измерительными устройствами (профилометры, микроскопы и др.);  $K_3$  – измерительные сигналы с датчиков (индуктивных, тензометрических, температурных и др.);  $K_4$  – обмен информацией между АПС и ПК. Выходом ТС (блок 4) являются ПКПС обработанной поверхности (ПК<sub>2</sub>)  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ , которые после измерения передаются в 6 в виде множества  $M_5 = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_n\}$ . Аналогично измеряются в 7 и передаются в 6 параметры ЭС поверхности или соединения (множество  $M_7$ ).

Эксперименты по исследованию параметрической надёжности ТС обработки инструментами, оснащёнными ССТМ, проводились на призматических образцах из чугуна СЧ20; цилиндрических образцах из стали 45, в виде ступенчатых валиков или колец. Выбор материалов обусловлен широким применением в машиностроении при изготовлении базовых деталей металлорежущих станков и технологической оснастки (СЧ20); соединений типа подшипников скольжения, применяемых в высокоточных узлах машин и механизмов и др.

множеств  $M_i$ :  $M_1$  – параметры качества ПК<sub>1</sub> поверхности после предварительной обработки или режимы предварительной обработки;  $M_2$  – геометрические или другие параметры инструмента;  $M_3$  – режимы и другие условия обработки в ТС (блок 4). Регламентируются пределы варьирования факторов, определяющие исследуемую область факторного пространства.

В схему на рисунке 1 также включены испы-

Исследовались ТС: 1) торцевого фрезерования композитом 10 (ТФ); 2) алмазного выглаживания (АВ) плоских поверхностей после торцевого фрезерования (ТФ + АВ); 3) чистового точения наружных цилиндрических поверхностей композитом 10 (ТК10); 4) АВ после чистового точения (ТК10 + АВ) 5) комбинированной антифрикционной обработки (КАФО), включающей точение композитом 10 цилиндрических деталей, нанесение мягких прирабочных плёнок (МП) и АВ (ТК10 + МП + АВ); 6) приработки (ПР) сопряжений «вал – вкладыш» после КАФО.

Для лезвийной обработки композитом 10 применялись фрезы с режущими вставками и токарные державки для стандартных резцовых вставок. В качестве управляющих факторов ТС лезвийной обработки на разных этапах исследований рассматривались скорость  $V$  (м/мин), подача  $S$  (мм/об) и глубина  $t$  (мм) резания; жёсткость  $j$  ТС; геометрия режущей части инструмента.

АВ осуществлялось инструментом упругого действия с инденторами из АСПК. Управляющие факторы – скорость  $V_{AB}$  (м/мин), подача  $S_{AB}$  (мм/об) и сила  $Q_{AB}$  (Н) обработки, СОТС.

Мягкие прирабочные плёнки наносились фрикционным латунированием или химическим меднением ( $M_{mn}$  – вид материала пленки).

Детали обрабатывались на вертикально-фрезерных станках 6А12П; 6Р13Ф3, FQW-400, на токарно-винторезном станке 16К20, токарно-фрезерном обрабатывающем центре мод. EX-308.

Триботехнические испытания образцов проводились на испытательном стенде с измерительно-регистрирующей аппаратурой на базе блока аппаратно-программного интерфейса «Осциллограф». Приработка цилиндрических пар трения скольжения «Сталь 45 – бронза ОЦС 5-5-5 или антифрикционный чугун АЧС-1» ( $M_s$  – материал вкладыша) осуществлялась при варьировании управляющих факторов скорости  $V_{np}$  (м/мин) относительного скольжения поверхностей трибоэлементов, погонной нагрузки  $P$  (Н/мм) на трибосопряжение в процессе приработки, вариации номинальной погонной нагрузки на трибосоединение  $\Delta P/P$  (%).

Геометрические параметры качества и параметры эксплуатационных свойств поверхностей деталей контролировались с помощью компьютеризированных измерительных систем и аппаратно-программных средств, разработанных в БГТУ. Информационно-измерительная система ИИС-1 включающая профилограф-профилометр мод. 170311 («Калибр») и кругломер мод. 175121 («Калибр») позволяет измерить следующие параметры 1) для профилограмм и волнограмм –  $Ra, Rz, Rmax, Rp, Rv, Rq, Sm, S, tp, tg \alpha_i, l_0, \rho, \rho_m, b, v, \Delta, Wa, Wz, Wmax, \rho_w$  2) для круглограмм –  $EFK, EFKa, EFKq, TFE$ .

Для контроля параметров шероховатости и волнистости на рабочих местах разработаны мобильные ИИС-2 и ИИС-3. Измерительным модулем является блок привода с датчиком-преобразователем (например, от профилометра мод. 170622 («Калибр»)). В качестве вычислительно-управляющего модуля применяется ноутбук. Для обеспечения пользовательского интерфейса и обработки результатов измерений разработаны соответствующие программы.

Исследования поверхностной структуры деталей осуществлялись с при-

менением компьютеризированной системы сканирующей микроскопии на базе инвертированного металлографического микроскопа Leica DM IRM HC.

Для оценочных исследований поверхностной структуры образцов была разработана система металлографического анализа на базе применения отечественных микроскопов, цифровой видео- и фотоаппаратуры и ПК.

**В четвёртой главе** изложены результаты исследований влияния динамики процесса ППД одноинденторными инструментами упругого действия на формирование геометрических параметров качества обрабатываемых плоских и цилиндрических поверхностей деталей.

Исследовалась динамика движения индентора по нормали к обрабатываемой поверхности на основе известных положений теории колебаний. Движение индентора по координате  $Z$  инструмента упругого действия (рисунок 2) происходит по сложному закону, который определяется конструктивными па-

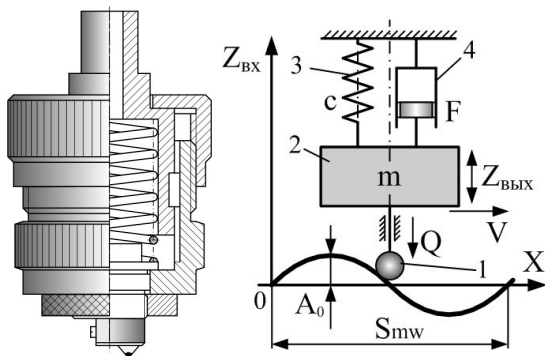


Рисунок 2 – Динамическая модель процесса АВ инструментом упругого действия: 1 – индентор; 2 – подвижная часть с массой  $m$ ; 3 – пружина; 4 – демпфирующий элемент (смазка)

раметрами инструмента (массой подвижных частей  $m$ , жёсткостью  $c$  упругого элемента, вязкостью смазки) и технологическими факторами процесса ППД, включающими геометрические параметры качества обрабатываемой поверхности (макроотклонения, волнистость, отклонения от круглости) и режимы обработки (скорость  $V$  и подача  $S$  инструмента, сила  $Q$  воздействия индентора на поверхность). Известно, что через динамические системы сигнал может проходить без искажений, с усилением или с ослаблением, что определяется её частотными характеристиками.

Таким образом, вертикальные колебания индентора  $Z_{вых}$  зависят от величины  $Z_{вх}$ , определяемой величиной волнистости обрабатываемой поверхности и амплитудно- и фазочастотными характеристиками  $K(\omega)$  и  $\varphi(\omega)$  инструмента, который рассматривается как многомассовая замкнутая система с упругими связями между элементами. При обработке поверхностей деталей с волнистостью входной величиной модели будет периодический сигнал, представляющий собой сумму синусоидальных составляющих, получаемых при разложении реального дифференцируемого профиля в ряд Фурье. Первые гармоники такого разложения представляют собой профили волнистости для плоских поверхностей и отклонения от круглости для цилиндрических.

Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний индентора при обработке поверхности с параметрами волнистости  $W_{max}$  и  $S_{mw}$  с учётом вязкого демпфирования имеет вид:

$$\ddot{Z} + 2n\dot{Z} + \omega_0^2 Z = k \frac{W_{max}}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{S_{mw}} X\right), \quad (7)$$

где  $\omega_0 = c/m$  – собственная частота колебаний подвижной части инструмента;



$2n = F/m$  – коэффициент вязкого демпфирования.

На основе применения методов теории колебаний и теории автоматического регулирования, наряду с уравнениями амплитудно- и фазочастотной характеристик, получено условие движения индентора по траектории 1 (рисунок 3), или условие его постоянного контакта с поверхностью (безотрывности):

$$\left( \frac{c}{m} - \left( \frac{2\pi V}{Smw} \right)^2 \right) \sin \left( \frac{2\pi}{Smw} X \right) + \frac{Z_0}{Wmax} \frac{c}{m} \geq 0. \quad (8)$$

Анализ теоретических зависимостей позволил получить ограничение скорости АВ по условию безотрывности обработки, включающее конструктивные ( $m$ ) и технологические ( $Q, Smw, Wmax$ ) факторы:

$$V \leq \frac{Smw}{2\pi} \sqrt{\frac{2Q}{mWmax}}. \quad (9)$$

При динамических режимах в наихудшем случае (при коэффициенте затухания  $n = 0$ ) экстремальное значение усилия обработки составляет:

$$Q_{экстр} = Q_n \pm \frac{Wmax}{2} m \left( \frac{2\pi V}{Smw} \right)^2. \quad (10)$$

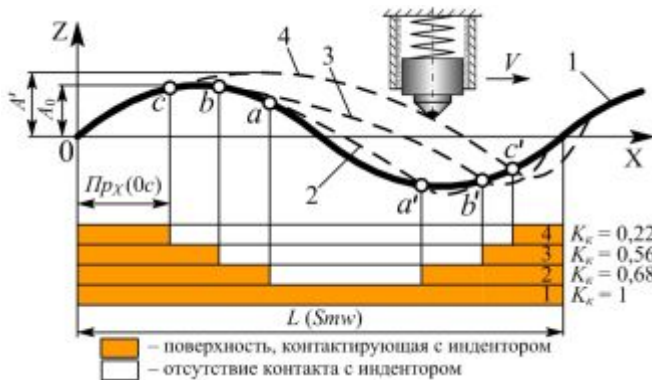


Рисунок 3 – Схемы движения индентора при АВ плоских волнистых поверхностей:

$K_k$  – коэффициент контактирования:

- 1 – безотрывная обработка; 2, 3 – обработка с отрывом индентора от профиля волны; 4 – обработка с подбрасыванием индентора

равному отношению суммы проекций  $Pr_x L_i$  участков контакта индентора с поверхностью к базовой длине измерения  $L$  ( $L_{min} = (5 \dots 10) Smw$ ) (рисунок 3).

Адекватность полученных теоретических результатов оценивалась методом физического моделирования процесса АВ поверхности детали с искусственно образованной волнистостью. Выбранный диапазон изменения скорости выглаживания обеспечивал вариацию частот вынужденных колебаний индентора в пределах  $f = 20,9 \dots 240$  Гц. Этот интервал включает резонансную частоту  $f_0$ . Сила выглаживания составляла  $Q = 30$  Н при радиусе алмазного индентора  $r = 2$  мм. Подача во всех случаях поддерживалась постоянной:  $S = 0,1$  мм/об.

Результаты физического моделирования подтвердили адекватность полученных теоретических моделей. Значения среднего коэффициента контактирова-

Из (10) чётко просматривается влияние параметров волнистости поверхности на изменение значений силы обработки ППД инструментом упругого действия. Увеличение коэффициента затухания  $n$  способствует возрастанию динамических сил при обработке, что влечёт за собой увеличение неоднородности обрабатываемой поверхности по параметрам качества.

Безотрывность процесса АВ при обработке волнистых поверхностей предлагается оценивать коэффициентом контактирования  $K_k$ ,



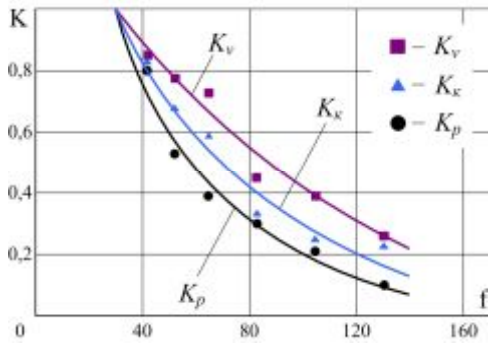


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента контактирования индентора с поверхностью от частоты его колебаний

действия индентора на обрабатываемую поверхность 5 обеспечивает предварительно сжатая с натягом  $Y_0$  пружина 4 с жёсткостью  $c$ . Источником вынужденных колебаний индентора являются отклонения радиуса  $\rho(\varphi)$  фактического

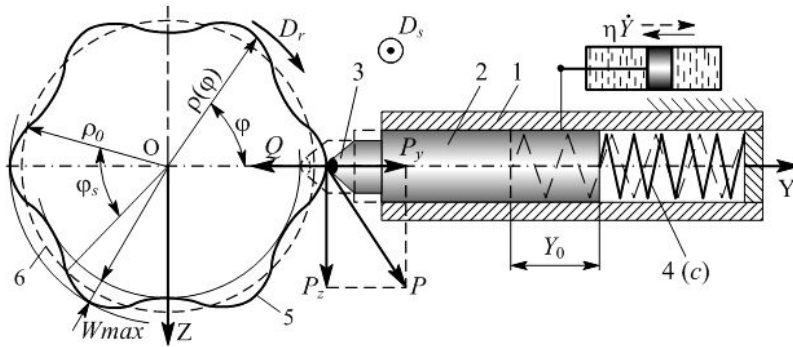


Рисунок 5 – Схема процесса АВ цилиндрических поверхностей деталей с отклонениями от круглости

ния  $K_k$ , а также коэффициентов контактирования с поверхностью выступов  $K_p$  и впадин  $K_v$  в зависимости от частоты  $f$  показаны на рисунке 4.

Модель ТС АВ цилиндрической поверхности детали (рисунок 5) характеризуется как нелинейная колебательная система с одной степенью свободы, совершающей вынужденные колебания при наличии сил вязкого сопротивления и трения. Инструмент ППД состоит из корпуса 1, подвижного плунжера 2 с индентором 3. Сила  $Q$  воздействия индентора на обрабатываемую поверхность 5 обеспечивает предварительно сжатая с натягом  $Y_0$  пружина 4 с жёсткостью  $c$ . Источником вынужденных колебаний индентора являются отклонения радиуса  $\rho(\varphi)$  фактического профиля поверхности в нормальном сечении в виде волны с максимальной высотой  $Wmax$  и угловым шагом волны  $\varphi_s$  от номинального радиуса  $\rho_0$ . Номинальный профиль сечения 6 является средней линией  $m_w$  волнистости.

В соответствии с теорией колебаний уравнение

движения подвижной части такой системы определяется по зависимости:

$$m\ddot{y} + F(y, \dot{y}, t) = 0 \tag{11}$$

При обработке поверхности детали отклонения поверхности  $\rho(\varphi)$  создают кинематические возбуждения  $f(t)$  с волнистостью  $Wmax$  и шагом  $\varphi_s\rho_0$ . Приведенная возмущающая сила  $P(t) = cf(t)$ , то с учётом сил вязкого сопротивления  $n\dot{Y}$ , то уравнение динамики устройств ППД упругого действия имеет вид (12). Уравнение (13) определяет синусоидальный характер отклонений поверхности.

$$\ddot{Y} + 2n\dot{Y} + \omega_0^2 Y = \frac{cf(t)}{m} \tag{12}; \quad f(t) = \frac{Wmax}{2} \sin\left(2\pi \frac{V}{\varphi_s\rho_0} t + \gamma_0\right). \tag{13}$$

Установившаяся амплитуда  $a_n$  колебаний индентора определяется уравнением (14), а коэффициент динамичности  $\mu$  – уравнением (15):

$$a_n = \frac{Y_{cm}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}} \tag{14}; \quad \mu = \frac{a}{Y_{cm}} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \frac{4\omega^2 n^2}{\omega_0^4}}}. \tag{15}$$

Здесь  $n = \eta/2m$ , где  $\eta$  – коэффициент вязкого сопротивления.

В экспериментах по исследованию влияния динамики процесса АВ на постоянство контакта индентора с поверхностью обрабатывались образцы из стали 45 диаметром 50 мм. Скорость выглаживания изменялась от 15,7 до 99 м/мин при подаче  $S = 0,1$  мм/об с силой  $Q = 100$  Н (радиус индентора  $r_{инд} = 3,5$  мм) при наличии смазки.

На рисунке 6 показано сечение 1 образца с моделью отклонений от круглости  $\rho(\varphi)$  и обозначения характерных участков отклонений, и круглограмма 2 поверхности 1. На участ-

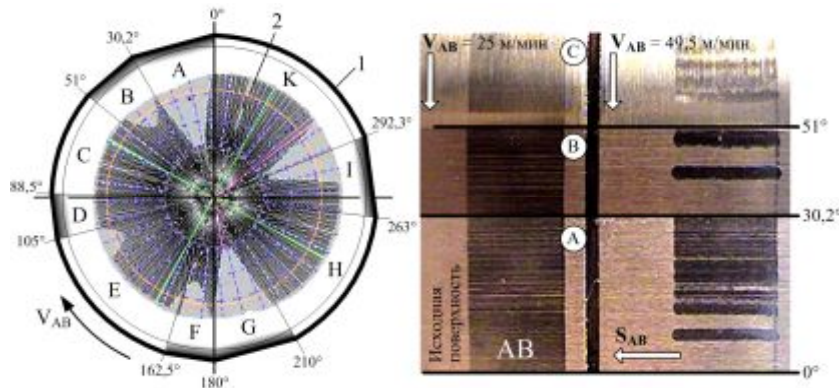


Рисунок 6 – Диаграмма 1 поверхности модели с отклонениями от круглости и её круглограмма 2 и типовые фотографии участков поверхности, обработанных с разными скоростями выглаживания  $V_{AB}$

ках А, В, С исходная поверхность до АВ выглядит как равномерная светлая. При скорости выглаживания 25 м/мин формируется равномерная топографическая структура поверхности, что косвенно указывает на примерно одинаковое качество обработки. При скорости АВ 49,5 м/мин наблюдается прерыви-

стость обработки поверхности в виде характерных тёмных полос, являющимися следами контакта индентора с поверхностью.

Изменение характера контакта индентора с поверхностью при обработке деталей инструментами упругого действия определяет понятие *технологической устойчивости процесса обработки ППД* – способности обеспечивать требуемые значения параметров  $R$  качества поверхностного слоя с регламентированными отклонениями  $\pm\delta R$  с заданной надёжностью  $P(R_i \in (R_i \pm \delta R_i))$  непрерывно по всей обрабатываемой поверхности детали.

Для процесса ППД цилиндрических поверхностей инструментами упругого действия получены критерии его технологической устойчивости решением дифференциального уравнения равновесия подвижных частей инструмента, обеспечивающего требуемые значения силы выглаживания  $Q$  при обработке в допустимых пределах:  $Q \in (Q_0 + \beta Q_0; Q_0 - \delta Q_0)$ , где  $Q_0$  – номинальное значение силы;  $\beta, \delta$  – допустимые верхняя и нижняя относительные величины вариации силы  $Q_0$ . Ограничения максимальной скорости АВ из условия безотрывной обработки определяются зависимостями:

$$V_{max1} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{\delta \frac{(cY_0)Smw^2}{m Wmax}} \quad (16); \quad V_{max2} \leq \frac{1}{\pi\sqrt{2}} \sqrt{(\beta+1) \frac{(cY_0)Smw^2}{m Wmax}}. \quad (17)$$

Здесь учитываются параметры волнистости обрабатываемой поверхности  $Wmax$  и  $Smw$ , конструктивные параметры инструмента ППД ( $c, m$ ) и технологические факторы ( $Q_0 = cY_0, \delta, \beta$ ). По условию  $V_{max} \leq \min(V_{max1}, V_{max2})$  определяется фактическое значение скорости обработки поверхности.

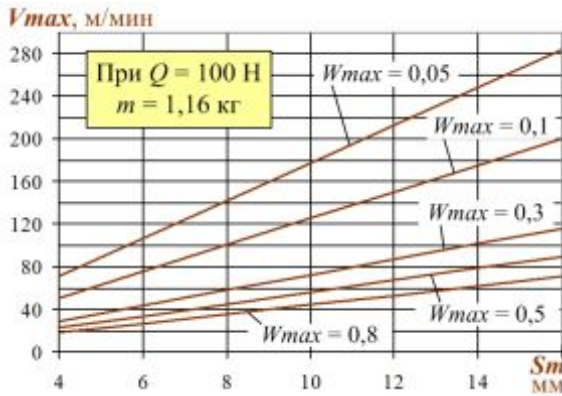


Рисунок 7 – Пример диаграммы определения допустимой скорости обработки из условия безотрывности индентора при ППД поверхностей с отклонениями от круглости

ческих поверхностей деталей.

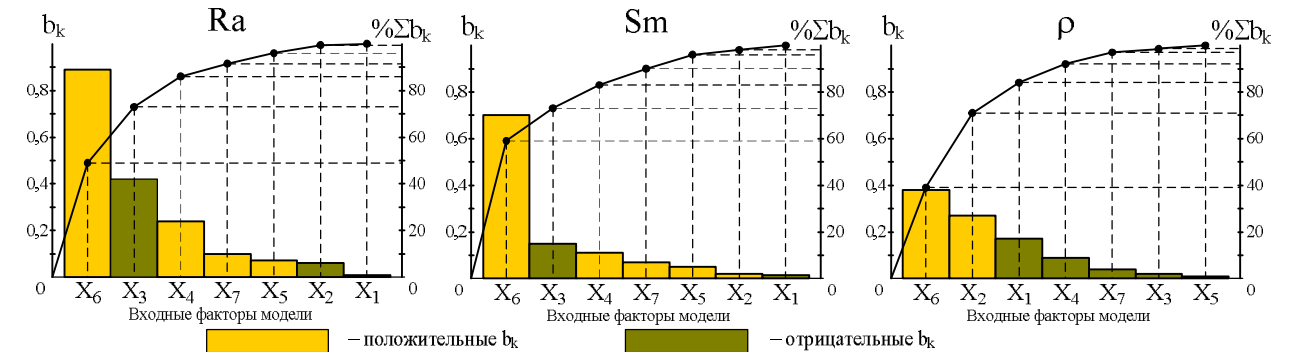
На основе результатов экспериментов построены модели (2, 3) формирования ряда параметров шероховатости плоских и цилиндрических поверхностей деталей для ТС «ТФ», «ТФ + АВ», «ТК10», «ТК10 + АВ», «ТК10 + МП + АВ». Например, модель формирования параметра *Ra* в ТС «ТК10 + МП + АВ» имеет вид:

$$Ra = 14K \frac{S^{0,41} t^{0,25} S_{AB}^{0,1}}{V^{0,05} j^{0,21} Q_{AB}^{0,1} V_{AB}^{0,6}}, \tag{18}$$

где  $K = 3^{1,05} = 3,17$  – для фрикционного латунирования;  $K = 1,5^{1,05} = 1,53$  – для химического меднения.

Анализ значений критериев Кохрена, Стьюдента и Фишера показывает, что дисперсии в опытах планов экспериментов однородны, большинство факторов статистически значимы, модели адекватны экспериментальным данным.

Ранжирование факторов обработки по степени влияния на формируемые параметры качества поверхностей методом Парето (рисунок 8) позволяет выбрать факторы, обеспечивающие 70 %-ый вклад в формирование как отдельного, так и комплекса параметров с целью технологического управления их величиной.



Код фактора $X_i$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$
Входной фактор	$S_{z\text{ фрез}}$ , мм/зуб	$V_{\text{фрез}}$ , м/мин	$Q$ , Н	$S_{AB}$ , мм/об	$V_{AB}$ , м/мин	$S_{z\text{ фрез}}$	$Q V_{AB}$

Рисунок 8 – Пример анализа Парето влияния входных факторов на формирование параметров шероховатости плоских поверхностей в ТС «торцевое фрезерование композитом 10 + АВ»

Области допустимых скоростей обработки, обеспечивающих технологическую устойчивость процесса ППД инструментами упругого действия (при  $\delta = 1, \beta = 0$ ), удобно интерпретировать с помощью диаграмм (рисунок 7), на которых допустимые области значений  $V_{max}$  лежат ниже соответствующих кривых.

**Пятая глава** посвящена результатам исследований параметрической надёжности ТС обработки деталей по формированию геометрических параметров качества плоских и цилиндрических



Результаты экспериментов позволили выявить диапазоны устойчивого технологического управления параметрами шероховатости в исследуемых ТС.

При исследовании параметрической надёжности ТС установлено, что различные параметры качества при одном и том же допустимом  $\delta$ -%-ом отклонении от средней заданной величины обеспечиваются с различной надёжностью (рисунок 9). Так, в интервале  $\pm 0,3\bar{R}_i$  для высотных параметров вероятность их обеспечения колеблется в ТС «ТФ» в пределах от 0,63 для  $R_p$  до 0,97 для  $R_z$ ; в ТС «ТФК10 + АВ» – от 0,73 для  $R_p$  до 0,89 для  $R_a$ .

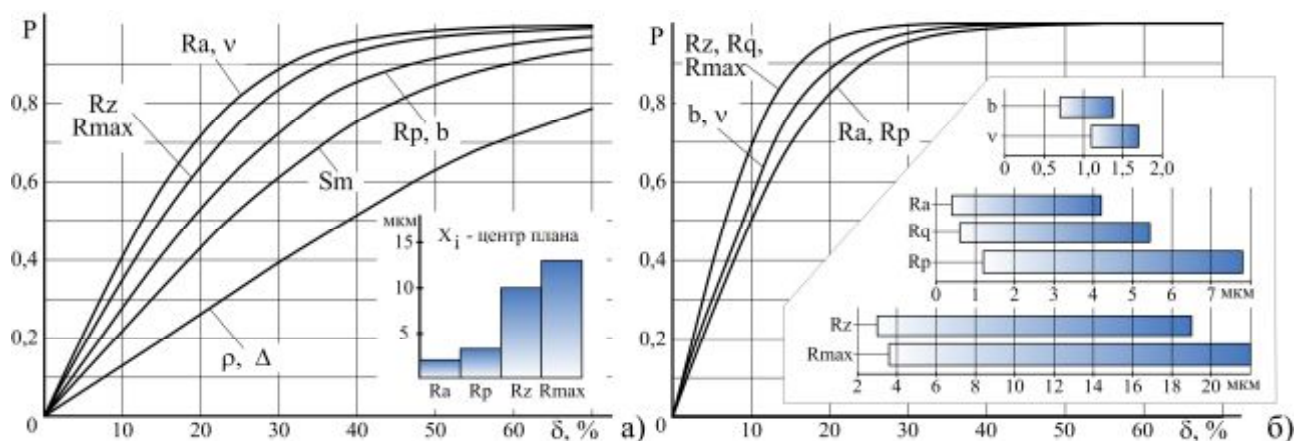


Рисунок 9 – Вероятность технологического обеспечения параметров шероховатости и диапазоны устойчивого технологического управления ими: а – в ТС «ТФК10 + АВ» обработки плоских поверхностей; б – в ТС «ЧТК10 + АВ» обработки цилиндрических поверхностей

Для оценки степени влияния факторов АВ на формирование параметров отклонений от круглости предложены коэффициенты, определяемые по зависимости  $K_{Ri} = R_{iAB} / R_{im}$ , где  $R_{im}$ ,  $R_{iAB}$  – величина  $i$ -того параметра, полученного, соответственно, при обработке точением и последующем АВ. Для рассматриваемой факторной области интервалы варьирования коэффициентов влияния:  $K_{EFK} = 0,56...0,95$ ;  $K_{EFKa} = 0,58...0,81$ ;  $K_{EFKq} = 0,64...0,91$ ;  $K_{TFE} = 0,65...1,1$ .

**В шестой главе** рассматриваются вопросы технологического обеспечения триботехнических характеристик цилиндрических поверхностей деталей машин, работающих в соединениях трения скольжения, и пути их улучшения при обработке инструментами, оснащёнными ССТМ.

Для исследуемых характеристик (коэффициенты трения в начале  $f_1$  и конце  $f_0$  приработки; величины суммарного начального износа сопряжения  $h_{01} + h_{02}$ ; интенсивности нормального изнашивания вала  $I_1$  и вкладыша  $I_2$ ) получены имитационные модели типа (3). Установлено, что исследуемыми характеристиками

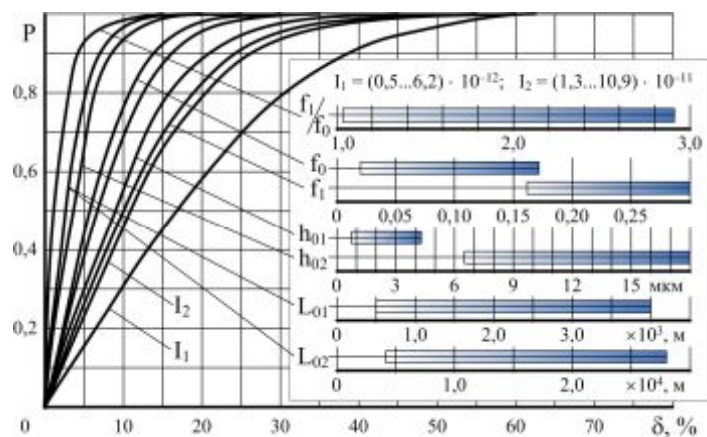


Рисунок 10 – Вероятность формирования параметров износостойкости в зависимости от величины  $\delta$  и диаграмма их варьирования

можно управлять в достаточно широких пределах с высокой надёжностью за счёт варьирования факторов триботехнологической системы (рисунок 10).

Установлено, что триботехнологическая система «ТК10 + МП + АВ + ПР) даёт возможность обеспечивать группу характеристик ( $f_1, f_0, (h_{01} + h_{02}), I_1, I_2$ ) за счёт изменения факторов в следующей последовательности, начиная с наиболее эффективного:  $\Delta P/P \rightarrow V_{np} \rightarrow M_{nn} \rightarrow S_{AB} \rightarrow S \rightarrow Q_{AB} \rightarrow j \rightarrow V \rightarrow M_e \rightarrow t \rightarrow P \rightarrow V_{AB}$ . Данное ранжирование статистически значимо с коэффициентом конкордации  $\omega = 0,53$ . Высокая степень влияния фактора  $\Delta P/P$  указывает на желательность проведения приработки под воздействием управляемых динамических нагрузок.

Установлена динамика изменения параметров шероховатости поверхности вала от чистового точения композитом 10 до окончания приработки. После чистового точения комплекс Крагельского-Комбалова  $\Delta = 0,79$ , после фрикционного латунирования и АВ  $\Delta = 0,022$ , а после процесса приработки  $\Delta$  уменьшается до 0,01, то есть 2,2 раза меньше технологического значения, что свидетельствует о повышении износостойкости поверхности.

Микротопографический анализ поверхностей валов показал, что в процессе приработки мягкая прирабочная плёнка не ликвидируется.

Одним из методов повышения износостойкости поверхностного слоя деталей является нанесение микрорельефов на обрабатываемую поверхность. Разработан программный метод формирования микрорельефов, заключающийся в обеспечении требуемой траектории движения центрально или периферийно расположенного индентора инструмента на станке с ЧПУ. При этом могут быть получены микрорельефы различных по конфигурации типов, например, синусоидальные (регулярные и квазирегулярные), несинусоидальные, стохастические с различной плотностью «дорожек», степенью и глубиной упрочнения поверхностного слоя детали и др.

Например, уравнение траектории движения оси инструмента при формировании квазирегулярного синусоидального микрорельефа с амплитудной модуляцией имеет вид (рисунок 11):

$$Y_i = A \left( \sin \left( \frac{2\pi}{T_1} X_i + (i+1)\Delta\varphi \right) + \Delta Y \right) \left| \sin \left( \frac{k_1 2\pi}{T_1} X_i \right) \right|. \quad (19)$$

Здесь  $k_1$  – число периодов основной гармонике микрорельефа в одном периоде огибающей;  $\Delta\varphi$  – величина фазового сдвига между двумя смежными «дорожками» обработки.

Разработаны соответствующие алгоритмические модели и программное обеспечение для компьютерного моделирования процесса формирования микрорельефов плоских (прямолинейных и фланцевых) поверхностей деталей.

**В седьмой главе** рассматривается решение задачи обеспечения закономерного распределения параметров качества по поверхности детали, обрабатываемой чистовыми и финишными методами.

Предлагаемый подход к управлению технологическими процессами позволяет формировать параметры качества, значения которых закономерно из-

меняются по обработанной поверхности детали, что позволяет обеспечить равномерное изнашивание в условиях действия изменяющихся во времени и в пространстве эксплуатационных нагрузок.

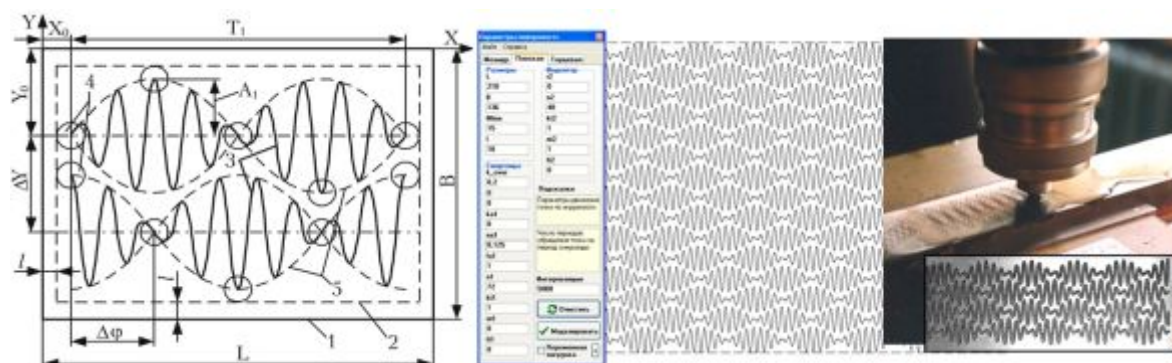


Рисунок 11 – Результаты моделирования квазирегулярного микрорельефа с амплитудной модуляцией и вид обработанной поверхности при реализации процесса ППД методом АВ

Для определения причин неравномерного изнашивания поверхностей деталей, работающих в соединениях трения скольжения технологического оборудования и оснастки (продольные плоские и цилиндрические направляющие скольжения, подшипники скольжения), предложены модели контактных взаимодействий поверхностей типовых соединений. Установлено, что в процессе работы соединения поверхность одного из трибоэлементов изнашивается неравномерно, что связано с конструктивными особенностями соединения, определяющего длительность контакта участка поверхности.

В качестве основных эксплуатационных воздействий, обуславливающих износ поверхностей, рассматривались факторы давления  $P$  на единицу площади поверхности (нагрузка) и скорости относительного скольжения  $V$  поверхностей, значения которых изменяются во времени и в пространстве (по поверхности контакта). Предложена классификация типовых воздействий на поверхности трибоэлементов по характеру изменений во времени и в пространстве.

Установлено, что наиболее общей является трапецеидальная модель изменения значений возмущающих воздействий в пространственно-временной области (рисунок 12). Можно выделить четыре типичных участка: участок  $x_1$  увеличения значений  $Y$  (нагружения  $P$  или разгона  $V$ ); участок  $x_2$  действия номинальных значений эксплуатационных факторов; участок  $x_3$  снижения величины  $Y$  (разгрузка, замедление); участок  $x_4$  с минимальным значением нагрузки  $P$  или скорости  $V$ . При допущении, что функции  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$  линейны, такой закон является простой и в то же время достаточно обобщающей моделью действующих возмущений как силового, так и скоростного характера.

Длительность некоторых участков  $X_i$  периода  $T$  может быть равна нулю, что с учётом вида функции  $f_i(x)$  каждого участка приводит к вырождению обобщённой функции  $Y = f(t, X)$  в частные функции изменения значений нагрузки  $P$  и скорости  $V$  (рисунок 12), носящие характер импульсного воздействия, синусоидального, трапецеидального, случайного с математическим ожиданием  $M\{Y\}$  и др.

Результаты моделирования силовых и скоростных воздействий на по-

верхности трибоэлементов показывают, что их изменение может приводить к неравномерному износу поверхности с параметрами качества, одинаково распределёнными по всей её площади. Снизить скорость изнашивания на участках с наиболее интенсивным эксплуатационным воздействием можно технологическим обеспечением ПКПС, которые будут распределены по поверхности по закону, соответствующему модели действующих силовых и скоростных факторов.

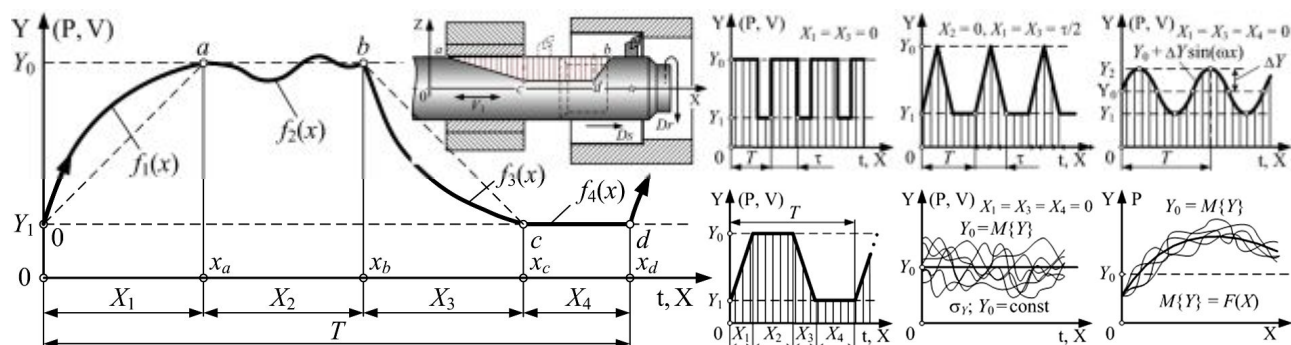


Рисунок 12 – Обобщённая и частные функции изменения значений нагрузки  $P$  и скорости  $V$  на поверхности элементов триботехнических систем в пространственно-временной области

Формирование ПКПС по заданному закону в процессе обработки позволит обеспечить применение ТС с высокой технологической гибкостью – способностью обеспечить требуемые значения ПКПС в регламентированных интервалах с заданной надёжностью за счёт изменения значений управляющих факторов с учётом механизма технологического наследования.

В ТС с низкой технологической гибкостью (ТГ1) управляющие факторы являются постоянными по величине в пределах технологического перехода, что позволяет обеспечить формирование постоянных значений ПКПС или ПЭС в заданных пределах по всей обработанной поверхности.

ТС с высокой технологической гибкостью (ТГ2) характеризуется возможностью изменять значения одного или нескольких управляющих технологических факторов в пределах технологического перехода по заданному закону, что позволяет обеспечить формирование закономерного изменения значений ПКПС или ПЭС по обрабатываемой поверхности с максимальной надёжностью.

Разработана структурная модель программного управления процессом закономерного изменения параметров качества поверхностей деталей.

Реализация программного управления в ТС с ЧПУ для обеспечения закономерно изменяющихся ПКПС базируется на построении зависимостей изменения управляющих факторов в процессе обработки, которые определяются на основе физико-статистического моделирования процессов формирования параметров качества, в том числе с учётом механизма технологического наследования.

Например, в ТС торцевого фрезерования композитом 10 с последующим АВ инструментом упругого действия для обеспечения трапецидального закона изменения значений параметра шероховатости  $Ra_{mp} = f(x_i)$  получена зависимость, связывающая силу  $Q(x_i)$  обработки с изменением значений  $Ra_{mp}$  по координате  $x_i$  обрабатываемой поверхности (рисунок 13). Изменение значений силы



$Q_{AB}$  при обработке зависит от смещения подвижной части инструмента вдоль его оси  $Z$  и, следовательно, сжатия пружины, поэтому целесообразно сразу определять величину перемещения по оси  $Z$  контрольной точки инструмента (индентора) на каждом элементарном участке  $x_i$  выглаживаемой поверхности:

$$Z(x_i) = \frac{1}{c} \left( \frac{1}{b_{01} Ra_{\text{фп}}^{b_{11}} S_{AB}^{b_{31}}} \right)^{1/b_{21}} (Ra_{\text{мп}}(x_i))^{1/b_{11}}, \quad (20)$$

где  $c$  – жёсткость пружины;  $Ra_{\text{фп}}$  – параметры шероховатости после торцевого фрезерования;  $S_{AB}$  – подача при АВ,  $b_{01}, \dots, b_{ni}$  – коэффициенты физико-статистической модели формирования ПКПС, которая строится по результатам экспресс-диагностики ТС.

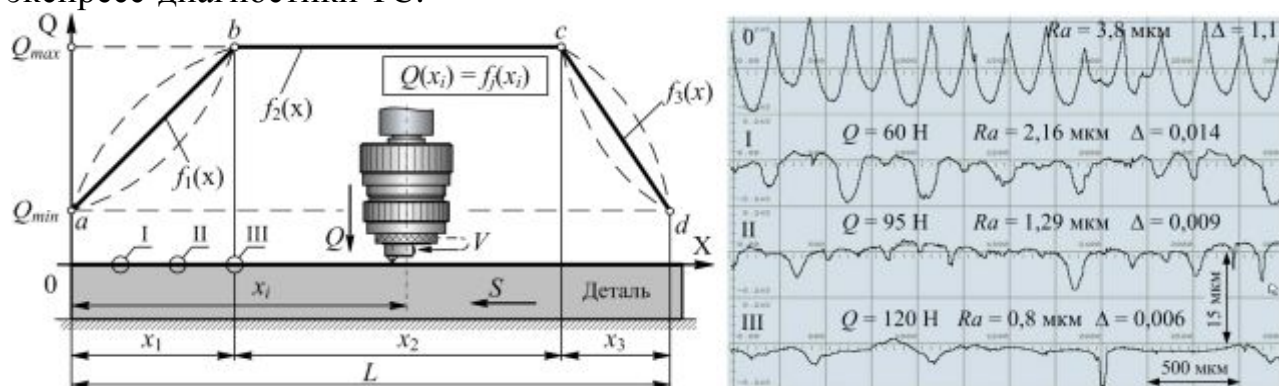


Рисунок 13 – Профилограммы участков поверхности, обработанной по трапецидальному закону изменению силы  $Q$  выглаживания (участок  $ab$ )

Расчёт по зависимостям типа (20), корректировка управляющих программ и обработка ведутся под управлением компьютера, входящего в СЧПУ.

Разработаны унифицированные программы управления подачей  $S$  инструмента, изменяющейся дискретно, трапецидально или синусоидально в рамках технологического перехода. Модель управления подачей  $S$  имеет вид:

$$S(X) = S_{\min} + (S_{\max} - S_{\min}) \cdot \left| \sin \left( \frac{2\pi}{t_s} X \right) \right|. \quad (21)$$

где  $X$  – текущая координата поверхности,  $t_s$  – период вариации подачи.

Разработаны модели и управляющие программы, обеспечивающие изменение значений и направления подачи при лезвийной обработке, что способствует формированию после последующей ППД участков поверхности детали с различными геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами.

**В восьмой главе** рассматриваются вопросы использования инженерного метода определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей по критериям их качества. В основу положен программный метод экспресс-диагностики (ЭД) как функционирующих ТС в соответствии с установленным регламентом (плановая ЭДТС), так и приобретаемых новых (приёмная ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производственных экспериментально-технологических лабораторий.

По результатам ЭДТС определяется возможность ТС обеспечить задан-



ные параметры качества  $R_{i3}$  обрабатываемых поверхностей в регламентируемых интервалах  $[R_{i3} \pm \delta R_{i3}]$  с вероятностью выполнения задания, равной или больше допустимой:

$$P((R_{i3}) \in [R_{i3} \pm \delta R_{i3}]) \geq [P_{min}]. \quad (22)$$

Если условие (22) не выполняется, то ТС не обеспечит заданные требования по качеству обрабатываемых поверхностей.

Выбор ТС, удовлетворяющей условию (22), должен быть основан на информации о её технологических возможностях по обеспечению ПКПС и ПЭС, которые определяются в ходе ЭДТС. ЭДТС предполагает автоматизацию обработки поверхностей образцов в соответствии с заданным планом эксперимента (блоки А, В, рисунок 14); измерение ПКПС (С1 И С2) и ПЭС (С3) с применением информационно-измерительных систем (блок С); процессом обработки и статистического анализа результатов диагностики (блок D). ЭДТС целесообразно осуществлять на основе реализации активного эксперимента, что позволяет получить физико-статистические модели формирования ПКПС и ПЭС в зависимости от условий обработки при наименьших затратах.



Рисунок 14 – Этапы автоматизации метода ЭДТС и типовая структура автоматизированной системы исследования ЭС соединений деталей машин: 1, 2, 3, 4 – индуктивные, тензометрические, температурные и микрофонные датчики; 5 – исполнительные элементы приводов устройств моделирования воздействий

Диагностика ТС по ПЭС обработанной поверхности имеет свою специфику, заключающуюся в том, что для получения численных значений ПЭС необходимо провести соответствующие стендовые испытания соединений под воздействием внешних эксплуатационных факторов или их аналогов. Наиболее эффективны компьютеризированные стенды, типовая структура которых обязательно включает устройство сопряжения датчиков с платой сбора данных, адаптированное к условиям измерений различных ПКПС и ПЭС (для исследования износостойкости цилиндрических соединений (рисунок 14)). Это устройство должно устойчиво и надёжно работать с различными типами датчиков – средствами регистрации и преобразования первичной информации, передавая её с минимальными помехами и искажениями при достаточном усилении.

В блоке D (рисунок 14) осуществляется обработка результатов измерений, полученных в ходе эксперимента (блок С). Специальное программное обеспечение позволяет получить модели формирования ПКПС и ПЭС при обработке поверхностей деталей в виде моделей (2), (3), по которым методом

имитационного моделирования определяется параметрическая надёжность ТС.

Одним из преимуществ разработанного метода является его универсальность, заключающаяся в открытости аппаратного и программного обеспечения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований предложено решение актуальной проблемы определения и повышения параметрической надёжности ТС по обеспечению параметров шероховатости и износостойкости поверхностей деталей при лезвийной и упрочняющей обработке инструментами, оснащёнными ССТМ, что имеет важное хозяйственное значение. Полученные в диссертационной работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Впервые решена проблема повышения надёжности технологического обеспечения параметров шероховатости и эксплуатационных свойств (на примере износостойкости) поверхностей деталей машин при чистовой и финишной обработке ППД инструментами из ССТМ за счет выбора соответствующей ТС из множества альтернативных по критерию максимума параметрической надёжности.

2. Разработаны теоретические основы назначения интервальных технологических значений параметров шероховатости поверхностей деталей машин в технологической документации, заключающимся в замене задаваемых конструктором их точечных средних значений на интервальные, что соответствует случайному характеру их формирования при обработке и обеспечивает выполнение конструктивных требований.

3. Разработаны научные основы оценки параметрической надёжности технологических систем механической обработки по обеспечению характеристик качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей в заданных интервалах, включающей построение физико-статистических моделей их формирования, реализацию и обработку результатов машинных экспериментов над моделями с применением методов имитационного моделирования и определения вероятности выполнения заданий по обеспечению требований к параметрам качества, являющейся показателем параметрической надёжности ТС.

4. Разработан комплексный подход к экспериментальным исследованиям ТС металлообработки, позволяющий унифицировать процедуры получения и анализа результатов в лабораторных и производственных условиях с применением созданных компьютеризированных измерительных систем оценки геометрических параметров качества поверхностей деталей и металлографического анализа на базе отечественной измерительной техники, микроскопов и цифровой фото- и видеотехники. Это решает задачу эффективной эксплуатации физически работоспособного, но морально устаревшего оборудования, и, в определенной мере, отвечает современным требованиям импортозамещения измерительного оборудования.

5. Разработаны модели влияния динамических свойств одноинденторных инструментов упругого действия при обработке ППД плоских и цилиндриче-

ских поверхностей деталей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости на постоянство контакта индентора с поверхностью, позволяющие определить условия обработки (силу воздействия индентора на поверхность, скорость обработки при известных массе подвижных частей и жесткости упругого элемента инструмента ППД и параметрах волнистости обрабатываемой поверхности), обеспечивающие формирование параметров качества в допустимых интервалах варьирования с максимальной надёжностью.

6. Получены уравнения вынужденных колебаний индентора при обработке плоских и цилиндрических поверхностей деталей ППД в ТС постоянной жесткости инструментом упругого действия и его амплитудно- и фазочастотные характеристики, отличающиеся учётом его конструктивных параметров (масса  $m$  подвижных частей, жёсткость  $c$  упругого элемента, коэффициент  $F$  вязкого трения при демпфировании) и технологических факторов (максимальная высота  $W_{max}$  и шаг по средней линии  $Smw$  основных гармоник разложения исходного профиля в ряд Фурье (в частном случае волнистости или отклонений от круглости), скорость  $V$  и сила  $Q$  выглаживания) и адаптированные к практическому использованию в условиях производства как аналитически, так и в виде диаграмм.

7. Установлено, что при обработке ППД инструментами упругого действия плоских и цилиндрических поверхностей с дифференцируемыми отклонениями от плоскостности или круглости возможно отсутствие контакта (отрыв) индентора с поверхностью, в связи с чем предложено понятие технологической устойчивости процессов обработки ППД инструментами упругого действия, условием которой является обеспечение регламентируемых значений параметров качества поверхностного слоя в допустимых интервалах варьирования с максимальной надёжностью непрерывно по всей обрабатываемой поверхности.

8. Теоретически определены критерии оценки технологической устойчивости процесса ППД из условий безотрывной обработки в виде зависимостей критических значений скорости  $V$  и силы  $Q$  выглаживания от параметров отклонений неровностей поверхности  $W_{max}$  и  $Smw$ , конструктивных параметров инструмента  $m$  и  $c$ , и допустимых относительных пределов  $\delta$  и  $\beta$  верхней и нижней границ вариации силы  $Q$  обработки. Полученные аналитические зависимости и диаграммы позволяют определить значения скоростей и сил обработки ППД, обеспечивающих формирование параметров качества поверхности в заданных интервалах варьирования, что нашло практическое применение при изготовлении деталей энергетических установок.

9. На основе полученных моделей формирования параметров шероховатости определены вероятности выполнения заданий по их регламентируемым значениям, как показатели параметрической надёжности ТС обработки плоских и цилиндрических поверхностей деталей из чугуна СЧ20 и стали 45 лезвийными методами обработки и ППД инструментами, оснащёнными ССТМ, и комбинированной антифрикционной обработкой («торцевое фрезерование или точение композитом 10», «торцевое фрезерование или точение композитом 10 + алмазное выглаживание (АВ)»; «точение композитом 10 + нанесение мягкой при-

рабочей плёнки + АВ») и сформированы аналитические и табличные базы данных, принятые к практическому использованию в качестве руководящего материала при выборе ТС из ряда альтернативных.

10. Установлены закономерности, получены физико-статистические модели, определены показатели параметрической надёжности формирования характеристик шероховатости и износостойкости в триботехнологической системе, включающей комбинированную антифрикционную обработку цилиндрических поверхностей деталей («точение композитом 10 + нанесение мягкой прирабочей плёнки + АВ») и приработку соединений трения скольжения. Установлено, что комплекс Крагельского-Комбалова  $\Delta = 0,79$ , полученный после чистового точения, уменьшается до  $\Delta = 0,01$  после процесса приработки, что обеспечивает повышение износостойкости поверхности на 18 – 22 %.

11. Разработаны новые технологии формирования микрорельефов на поверхностях деталей обработкой ППД программным способом в компьютеризированных ТС с ЧПУ для повышения триботехнических характеристик поверхностей, позволившие увеличить износостойкость функциональных поверхностей деталей соединений трения-скольжения и качения на 15 – 20%.

12. Разработаны модели нестабильности эксплуатационных воздействий (нагрузка  $P$ , скорость относительного скольжения  $V$ ) на поверхности деталей соединений трения-скольжения по характеру изменений во времени и в пространстве, позволяющие обосновать требуемую закономерность изменения значений параметров качества по поверхности детали при обработке, что позволит обеспечить её равномерный износ.

13. Разработаны модели и принципы, а также реализована технология программного управления процессом формирования параметров качества, значения которых закономерно изменяются по поверхности детали в соответствии с характером изменений эксплуатационных нагрузок, обеспечивающая равномерный износ поверхности и принятая к внедрению в службах технической подготовки производства промышленных предприятий.

14. Разработан инженерный метод определения параметрической надёжности ТС механической обработки поверхностей деталей, в основу которого положен программный метод экспресс-диагностики ТС (ЭДТС) как функционирующих, в соответствии с установленным регламентом (плановая ЭДТС), так и приобретаемых новых (приёмная ЭДТС), адаптированный к использованию в условиях производства.

15. Результаты исследований внедрены в ООО НПО «Группа компаний машиностроения и приборостроения», ЗАО «Клондайк электроникс». Применение предложенных решений позволило увеличить износостойкость функциональных поверхностей пар скольжения и качения (шарниры, втулки, оси, диски фрикционные, направляющие усилителей и др.), повысить ресурс эксплуатации деталей энергетических установок, снизить затраты на реализацию технологических процессов изготовления деталей, что позволило получить совокупный годовой экономический эффект до 2 800 000 руб.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Нагоркин, М.Н. Технологическое обеспечение шероховатости плоских поверхностей алмазным выглаживанием / М.Н. Нагоркин // Обработка металлов (технология, оборудование, инструмент). – 2002. – № 3 (16). – С. 17-24.
2. Аверченков, В.И. Новые подходы к автоматизации технологических исследований на основе виртуальных измерительных комплексов / В.И. Аверченков, В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин // Вестник Брянского государственного технического университета – 2005. – № 1. – С. 64-75.
3. Фёдоров, В.П. Управление формированием качества поверхностей и триботехнических характеристик соединений комбинированными методами обработки / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, В.В. Нагоркина, Е.В. Ковалёва. // Вестник Курганского университета. – 2006. – Вып. 2. Ч. 1 – С. 121-123.
4. Фёдоров, В.П. Адаптация поверхностей трибоэлементов к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалёва, Д.В. Чмыхов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 10. – С. 9-15.
5. Фёдоров, В.П. Адаптация поверхностей к нестационарным условиям эксплуатации обработкой ППД программным способом / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, Е.В. Ковалёва, Д.В. Чмыхов // Известия ОрёлГТУ. – 2007. – № 3/267. – С. 66-77.
6. Фёдоров, В.П. Технологические и метрологические аспекты адаптации поверхностей деталей машин к нестационарным условиям эксплуатации в процессе изготовления / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков // Справочник. Инженерный журнал. – № 10. – 2009. – С. 8-15.
7. Фёдоров, В.П. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием деталей машин с закономерным изменением качества поверхностных слоёв / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2011. – № 1(29). – С. 22-33.
8. Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения качества поверхностного слоя деталей при обработке на станках с ЧПУ / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2011. – № 2 (02). – С. 40-46.
9. Фёдоров, В.П. Автоматизация диагностики технологических систем по параметрам качества поверхностей обрабатываемых деталей / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков [и др.] // Вестник Брянского государственного технического университета – 2012. – № 1 (33). – С. 85-94.
10. Нагоркин, М.Н. Прогнозирование и диагностика технологических и триботехнологических систем на основе теории информации / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров, Т.А. Моргаленко, Е.В. Ковалева // Вестник Брянского государственного технического университета – 2013. – № 3 (39) – С. 134-140.
11. Нагоркин, М.Н. Влияние динамических характеристик устройств поверхностного пластического деформирования упругого действия на параметры качества поверхностей деталей машин / М.Н. Нагоркин, А.В. Тотай, В.П. Фёдоров // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2014. – № 4. – С. 70-79.
12. Нагоркин, М.Н. Условия эксплуатации функциональных поверхностей трибоэлементов в типовых соединениях трения скольжения / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров, А.В. Тотай // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2014. – № 6 (57). – С. 15-26.
13. Нагоркин, М.Н. Технологическое обеспечение параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин для эксплуатации в неоднородных условиях / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров, Е.В. Ковалёва, М.П. Топорков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 1 (52). – С. 136-145.
14. Фёдоров, В.П. Моделирование и управление качеством поверхностного слоя дета-

лей с применением современных средств инструментального обеспечения и компьютерных технологий / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков, М.П. Топорков // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2016. – № 2 (53). – С. 138-147.

15. Нагоркин, М.Н. Управление формированием параметров качества поверхности детали в процессе обработки поверхностным пластическим деформированием / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров, А.В. Тотай, Е.В. Ковалева. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 8. – С. 4-13.

16. Сулов, А.Г. Комплексный подход к экспериментальным исследованиям технологических систем металлообработки по обеспечению параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин / А.Г. Сулов, В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин, И.Л. Пыриков // Научные технологии в машиностроении. – 2018. – № 10. – С. 3-13.

17. Нагоркин, М.Н. Регламентация параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в технологической документации / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров, И.Л. Пыриков, М.П. Топорков. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 3 (76). – С. 4-12.

18. Фёдоров, В.П. Инженерные методы технологического обеспечения регламентированных параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в процессе механической обработки / В.П. Фёдоров, А.Г. Сулов, М.Н. Нагоркин. // Научные технологии в машиностроении. – 2019. – № 4 (94). – С. 40-48.

19. Нагоркин, М.Н. Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием / М.Н. Нагоркин. // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2019. – № 5. – С. 122-127.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science:**

20. Fyodorov, V.P. Controlling the parameters of the component quality using program means while performing mechanical machining. / V.P. Fyodorov, V.I. Averchenkov, M.N. Nagorkin // Procedia engineering 150 (2016): 2nd International conference on industrial engineering (ICIE-2016). Pp. 899 – 905. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.047.

21. Fyodorov, V.P. Determination of parametric reliability of machining technological systems by simulation technique / V.P. Fyodorov, M.N. Nagorkin, A.V. Totai // IOP conf. series: Materials science and engineering; 124 (2016) 012053. doi: 10.1088/1757-899X/124/1/012053.

22. Nagorkin, M.N. Simulation modelling of tribotechnologies system and its parametric reliability assessment on tribotechnical parameters of the joints of sliding friction / M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, V.V. Nagorkina // IOP conf. series: Materials science and engineering; 177 (2017) 012079. doi: 10.1088/1757-899X/177/1/012079.

23. Nagorkin, M.N. Features of waviness's formation and deviations from roundness of machine details surfaces at final machining with surface plastic deformation by elastic action tools / M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, A.V. Totai // Procedia engineering 206 (2017): 3rd International conference on industrial engineering (ICIE-2017). Pp. 169 – 175. doi: org/10.1016/j.proeng.2017.10.455.

24. Nagorkin, M.N. Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity / M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, E.V. Kovalyova // IOP Conf. Series: Materials science and engineering; 327 (2018) 042071. doi: 10.1088/1757-899X/327/4/042071.

25. Nagorkin, M.N. Automation of technological system diagnostics by parameters of quality of surfaces of machined parts / M.N. Nagorkin, V.P. Fyodorov, E.V. Kovalyova // Lecture notes in mechanical engineering. Proceedings of the 4th International conference on industrial engineering (ICIE 2018). Pp. 1535 – 1545. doi: org/10.1007/978-3-319-95630-5\_164.

#### **Монографии:**

26. Фёдоров, В.П. Технологическое обеспечение закономерного изменения параметров качества поверхности детали в процессе обработки: монография / В.П. Фёдоров, М. Н. На-

горкин, Е.В. Ковалёва. – Брянск : БГТУ, 2012. – 192 с.

27. Федоров, В.П. Принципы и средства технологического обеспечения заданных законов распределения параметров качества по обрабатываемой поверхности детали / В.П. Фёдоров, М.Н. Нагоркин // Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки. Коллективная монография / под ред. А.В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2014. – С. 172-220.

28. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надёжность технологических систем лезвийной и упрочняющей обработки инструментами из синтетических сверхтвёрдых материалов по геометрическим параметрам качества и триботехническим характеристикам поверхностей деталей / М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров, В.В. Нагоркина, Е.В. Ковалева // Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Том VII. Коллективная монография / под ред. А.В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2016. – с. 506-688.

29. Нагоркин, М.Н. Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов. Монография / М.Н. Нагоркин; Под ред. А.В. Киричека. – М. : Издательский дом «Спектр», 2017. – 304 с.

#### **Публикации в материалах научных конференций:**

30. Нагоркин, М.Н. Формирование закономерно изменяющихся параметров качества поверхностного слоя деталей в технологических системах повышенной гибкости / М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров // Инновационные технологии в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию академика П.И. Яшерицына, 28 – 29 окт. 2015 г. / Полоц. гос. ун-т; под общ. ред. А.И. Гордиенко, В.К. Шелега. – Новополоцк, 2015. – С. 138-141.

31. Нагоркин, М.Н. Технологическое обеспечение триботехнических характеристик цилиндрических поверхностей деталей машин типа подшипников скольжения / М.Н. Нагоркин, В.П. Фёдоров // Проблемы и перспективы развития машиностроения. Сб. науч. трудов междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию Липецкого государственного технического университета. 17 – 18 ноября 2016 г. – Часть 1. – Липецк : изд-во ЛГТУ, 2016 г. – С. 173-177.

32. Нагоркин, М.Н. Динамика процесса обработки ППД инструментами упругого действия поверхностей деталей с волнистостью или отклонениями от круглости / М.Н. Нагоркин // Виброволновые процессы в технологии обработки высокотехнологичных деталей: сборник трудов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2017. – С. 101-104.

33. Нагоркин, М.Н. Моделирование процессов формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием с учётом технологической наследственности / М.Н. Нагоркин // Научоёмкие и виброволновые технологии обработки деталей высокотехнологичных изделий: материалы международ. науч. симпозиума технологов-машиностроителей; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. – С. 181-186.

34. Нагоркин, М.Н. Формирование поверхностного слоя деталей из чугуна СЧ20 и стали 45 финишной обработкой поверхностным пластическим деформированием / Нагоркин М.Н // Машиностроение и техносфера XXI века. Сб. тр. XXV междунар. науч.-техн. конф., г. Севастополь, 10-16 сент. 2018 г. – Донецк : ДонНТУ, 2018. Т. 2 – С. 3-7.

35. Нагоркин, М.Н. Управление процессом закономерного формирования параметров качества поверхностей деталей методами ППД / М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров // Перспективные направления развития отделочно-упрочняющей обработки и виброволновых технологий [Электронный ресурс]: сб. тр. научного семинара, посвященного памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ, доктора технических наук, почётного профессора ДГТУ А.П. Бабичева; Донской гос. техн. ун-т. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2019. – С. 110-115.

36. Нагоркин, М.Н. Оценка параметрической надёжности технологических систем имитационным моделированием / М.Н. Нагоркин // Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем: сб. науч. тр. 7-й Междунар. науч.-техн. конф., 30-31 мая 2019 г., Юго-Зап. гос. ун-т; отв. ред. Е. В. Павлов; в 2-х т. Т. 2. – Курск : Юго-Зап. гос. ун-т , 2019. – С. 95-100.

НАГОРКИН МАКСИМ НИКОЛАЕВИЧ

**НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
ШЕРОХОВАТОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ИНСТРУМЕНТАМИ  
ИЗ СИНТЕТИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени доктора технических наук  
Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

---

Подписано в печать 06.11.2019. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Офсетная  
печать. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,86. Тираж 130 экз. Заказ . Бесплатно

---

Издательство Брянского государственного технического университета  
241035, Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7, БГТУ, тел. 58-82-49  
Лаборатория оперативной полиграфии БГТУ, ул. Институтская, 16