

На правах рукописи



Клачков Владимир Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ
СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ ПОСРЕДСТВОМ ИМИТАЦИОННОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Специальность: 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Научный руководитель: Козочкин Михаил Павлович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

**Официальные
оппоненты:**

Кульков Анатолий Александрович

доктор технических наук, профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва

Алленов Дмитрий Геннадиевич

кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», г. Москва

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный технологический университет», г. Рыбинск

Защита состоится 23 июня 2026 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/klachkov-vladimir-andreevich/index.php>.

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

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

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



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Сферическое соединение деталей часто встречается в изделиях, относящихся к различным отраслям промышленности, например, в автомобилестроении, станкостроении, судостроении, авиастроении, приборостроении, медицинской промышленности и др. Повсеместность применения сферических соединений обусловлена их компактностью, высокой несущей способностью, а также предотвращением заклинивания механизмов, по сравнению с плоскими соединениями.

Ключевой особенностью изделий со сферическим соединением является наличие высоких технических требований к точности геометрической формы и шероховатости сферических поверхностей, которые необходимы для достижения максимального пятна контакта сопрягаемых поверхностей. В качестве типовых требований к точности прецизионных изделий в сборе назначают следующие: шероховатость сферических поверхностей от Ra 0,8 мкм до Ra 0,2 мкм; отклонение от сферичности от 7 мкм до 0,5 мкм; допустимый диаметральный зазор от 15 мкм до 2 мкм; максимально допустимый момент трения в соединении от 1 Н·м до 0,1 Н·м. Требования варьируются от назначения и типоразмера изделия.

К типовым изделиям со сферическим соединением относятся шаровые шарниры, опоры и краны. Для шаровых кранов гидравлических систем и криогенных установок высокие технические требования обусловлены необходимостью сохранять герметичность и непроницаемость при высоких давлениях пропускаемой рабочей среды. Так, например, уменьшение отклонений формы уплотнительной поверхности запорной арматуры от 1,2 мкм до 0,6 мкм приводит к уменьшению утечки в 3–4 раза. Для высоконагруженных шаровых шарниров и опор дополнительно назначается техническое требование по допустимому диаметральному зазору в соединении, который необходим для формирования масляной пленки между сферическими поверхностями деталей. Уменьшение допустимого зазора и увеличение отклонений от сферичности приводит к разрушению масляной пленки и, как следствие, к поломке изделия. Увеличение допустимого диаметрального зазора приводит к увеличению динамических нагрузок и, как следствие, ускоренному выходу из строя изделия. Отдельно следует отметить сферическое соединение группы линз оптических приборов. От точности сопряжения линз и отклонения от сферичности поверхностей зависит степень искажения.

В качестве окончательной обработки прецизионных изделий со сферическим соединением могут выступать следующие методы: взаимная сферическая притирка (далее – ВСП) и электроэрозионная обработка. В подавляющем большинстве случаев назначается взаимная притирка сферических поверхностей деталей. Электроэрозионная обработка экономически оправдана для индивидуальной обработки деталей, так как при изготовлении изделий со сферическим соединением потребуется регулярная правка электрода-инструмента и периодическое измерение деталей, что резко увеличивает трудоемкость технологического процесса. Поэтому наиболее рационально использовать в качестве метода окончательной обработки именно ВСП.

В силу изложенных выше обстоятельств формирование методов прогнозирования результатов притирки и своевременного прекращения обработки является **актуальной научной задачей**, решение которой позволит повысить производительность технологических процессов на производстве и качество выпускаемой продукции.

Степень разработанности научной задачи. В литературе предлагаются различные методы повышения эффективности механизированной притирки. Наибольшую популярность в последнее время приобрели методы математического моделирования и мониторинга процесса обработки.

Значительный вклад в развитии методов математического моделирования процесса притирки внесли ученые-представители отечественной и зарубежных научных школ

притирки, среди которых П.Н. Орлов, С.Г. Бабаев, Н.И. Богомолов, Ф.В. Престон, Р. Аспенд, С.Дж. Еванс, Ф.Г. Ши, Б. Чжао, В.Т. Ценг, Дж.Х. Чин, Л.К. Кан, Ч.У. Лиу, Б.Т. Дай, Ср. Йех и многие другие. Наиболее выдающихся результатов достиг коллектив ученых-исследователей из Даляньского технологического университета, состоящий из З. Гэн, П. Чжоу, Л. Мэн, Ю. Янь, Д. Го. Разработанная коллективом математическая имитационная модель предназначена для прогнозирования съема припуска с притираемых свободным абразивом плоских поверхностей. Полученная модель обладает высокой предсказательной способностью и позволила сократить продолжительность притирочной операции плоского оптического стекла до 20 минут.

Большинство ученых, добившихся выдающихся результатов в создании методов математического моделирования процесса притирки, посвятили свои исследования процессу обработки плоских поверхностей. Однако область взаимной сферической притирки выходит за границы применимости существующих моделей в силу геометрического аспекта задачи.

В области мониторинга абразивного изнашивания значительный вклад внесли ученые и группы-исследователей отечественных и зарубежных научных школ, среди которых А.А. Деев, А.В. Баранов, А.Н. Пономарева, С.В. Тарасевич, В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, В.Л. Попов, В.В. Кузин, С.Н. Григорьев, М.П. Козочкин и многие другие. Большинство исследований, проведенных учеными, посвящались процессу шлифования и притирке закрепленным абразивом. Однако процесс ВСП реализуется методом свободного абразива, поэтому для формирования метода мониторинга необходимы дополнительные исследования в этом направлении.

Предлагаемые методы и подходы. Для решения обозначенной научной задачи предлагается использовать синтез имитационного моделирования процесса ВСП с динамическим мониторингом параметров виброакустического (далее – ВА) сигнала, возникающего при обработке. Данный комбинированный метод предполагает замену прямых контактных измерений геометрических характеристик деталей косвенным измерением параметров акустической эмиссии (далее – АЭ), а имитационная модель позволяет оценить характер съема припуска с притираемых сферических поверхностей при различных стратегиях обработки изделия. Таким образом удастся избежать проведения продолжительных и трудоемких экспериментальных исследований при разработке нового технологического процесса изготовления изделия со сферическим соединением.

В основу предлагаемого подхода заложена гипотеза о том, что поскольку в процессе притирки происходит изменение пятна контакта в сферическом соединении, то, следовательно, меняется жесткость самого соединения и количество абразивных зерен, одновременно участвующих в обработке. Эти изменения неизбежно сказываются на параметрах ВА сигнала в зоне обработки.

Объектом исследования является процесс взаимной сферической притирки.

Предметом исследования являются связи динамических и кинематических параметров процесса взаимной сферической притирки с качеством обрабатываемых изделий со сферическим соединением деталей.

Целью диссертационного исследования является повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки за счет улучшения ее управляемости посредством имитационного моделирования и мониторинга параметров акустической эмиссии в процессе обработки. Успешное достижение поставленной цели закладывает основы для автоматизации процесса ВСП.

Задачи исследования:

1. Спроектировать, изготовить и наладить специализированный сферопритирочный стенд, предназначенный для экспериментальных исследований процесса ВСП.
2. Разработать имитационную модель процесса ВСП, адекватно отражающую связи кинематических параметров процесса с характером съема припуска с обрабатываемых изделий со сферическим соединением деталей.

3. На основе разработанных модели и стенда произвести модельное и экспериментальное исследования связи кинематических параметров процесса ВСП с характером съема припуска с обрабатываемых изделий со сферическим соединением деталей.

4. С помощью экспериментальных исследований установить связи параметров АЭ, порождаемой в процессе ВСП, с геометрической точностью сферического соединения.

Положения, выносимые на защиту. Итогом решения вышеуказанных задач являются защищаемые положения, которые соответствуют частным научным результатам, обладающим научной новизной, теоретической и практической значимостью:

1. Конструкция специализированного сферопритирочного стенда, обеспечивающая возможность проведения экспериментальных исследований по оценке характера съема припуска с контактных поверхностей деталей сферического соединения при различных значениях параметров процесса ВСП.

2. Имитационная модель процесса ВСП, предназначенная для теоретических исследований характера съема припуска с контактных поверхностей деталей сферического соединения при различных значениях кинематических параметров обработки.

3. Научный эффект «локализации и повышения интенсивности съема припуска с контактных поверхностей деталей сферического соединения», впервые выявленный при исследовании процесса ВСП.

4. Установленный факт возможности использования мониторинга параметров АЭ для оценки качества изделия со сферическим соединением деталей при реализации процесса ВСП.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Разработана конструкция специализированного стенда для ВСП, позволяющая реализовать независимую кинематику трех видов сферического движения: прецессии, нутации и собственного вращения, отличающаяся от существующих сферопритирочных станков тем, что позволяет производить экспериментальные исследования процесса притирки трехкомпонентных шаровых шарниров и позволившая установить наличие случайного фактора процесса ВСП – распределение абразивной смеси в зоне обработки.

2. Разработана имитационная модель процесса ВСП, формирующая систему прогнозирования съема припуска и управления стратегиями обработки, а также отражающая связи кинематических параметров процесса обработки с качеством получаемого типового изделия со сферическим соединением, и учитывающая, в отличие от существующих моделей схожих процессов, особенности сферического контакта.

3. Установлены связи между стратегией обработки процесса ВСП и характером съема припуска с контактных сферических поверхностей деталей шарового шарнира, определяющим образующееся пятно контакта в сферическом соединении.

4. Установлены связи параметров сигналов АЭ, возникающих в зоне притирки, с моментами утраты абразивной суспензией режущей способности и моментом достижения качественных показателей обработки, что составляет основу для создания системы мониторинга при автоматизации процесса ВСП.

Теоретическая значимость определяется тем, что:

- разработана кинематика сферопритирочного стенда, предназначенная для исследований процесса обработки класса изделий типа трехкомпонентный шаровой шарнир, которая может быть применима для притирки изделий данного класса с различными конструктивными исполнениями;

- разработана новая имитационная модель процесса ВСП, являющаяся основой для создания системы управления процессом ВСП в части определения и генерации рациональных стратегий обработки при заданных параметрах качества изделия со сферическим соединением деталей;

- расширен научно-методический аппарат имитационного моделирования процесса притирки в части геометрического и кинематического аспекта взаимного движения обрабатываемых поверхностей;

- определены характерные особенности съема припуска с контактных поверхностей изделий со сферическим соединением деталей для различных комбинаций кинематических параметров процесса ВСП, а именно: локализация повышенного съема припуска с образованием пятен контакта в зонах увеличенных пройденных относительных путей элементарными сегментами сферических поверхностей обрабатываемых деталей; зависимость интенсивности съема припуска от изменения направления результирующего вектора скорости;

- установлено, что с ростом пятна контакта в сферическом соединении, по мере прохождения процесса притирки, происходит перераспределение внешней нагрузки по большей площади, что приводит к увеличению энергетических уровней низкочастотных колебаний и однозначным изменением характера сигнала АЭ.

Практическая значимость заключается в следующем:

1. Предложена новая кинематика и соответствующая конструкция сферопритирочного стенда, позволяющего реализовать различные стратегии кинематики сферического движения при обработке изделий типа трехкомпонентный шаровой шарнир с максимальным углом наклона шарового пальца до 30 град.

2. Продемонстрирована возможность прогнозирования характера съема реального припуска с контактных поверхностей изделия со сферическим соединением деталей при различных значениях кинематических параметров процесса ВСП посредством имитационного моделирования, обеспечивающая среднюю общую сходимость результатов проведенных экспериментальных исследований более 90%.

3. Экспериментально показано, что кинематические параметры процесса ВСП, определяющие характер распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей сферического соединения, определяют локализацию образования пятна контакта деталей обрабатываемого изделия со сферическим соединением. Для рассматриваемого в исследовании шарового шарнира лучшими показателями по характеру изменения пятна контакта в соединении обладает стратегия, в которой значения скоростей сферического движения прецессии, нутации и собственного вращения находятся во взаимном отношении, равном $4/1/-2$ соответственно.

4. Для определения момента окончания притирки, когда площадь пятна контакта сферических поверхностей заметно увеличивается, предложено производить мониторинг параметра K_{F2} как отношение эффективных амплитуд низкочастотного и высокочастотного диапазонов ВА сигнала. Показано, что плавный рост параметра K_{F2} свидетельствует об увеличении площади пятна контакта в сферическом соединении.

5. Показано, что резкий скачок с повышением уровней огибающей среднеквадратических значений ВА сигнала при сохранении образовавшихся уровней во времени свидетельствует об образовании явления шаржирования абразивного зерна в обрабатываемую контактную поверхность детали сферического соединения.

Методы исследования. Полученные теоретические результаты исследования были достигнуты с использованием методов целенаправленного анализа научно-технической литературы, систематизации и классификации полученных данных, синтеза эффективного технического решения, имитационного моделирования, компьютерного 3D-моделирования, декомпозиции структурного состава притирочного стенда по функциональному признаку. Практические результаты исследования были получены с использованием методов экспериментального исследования, измерения геометрических характеристик сферических поверхностей, стандартизированной записи и обработки ВА сигналов.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается:

- ориентированием на основные принципы системного подхода при проведении исследования;

- обоснованностью применения апробированных математических методов вычислений при расчетах;

- согласованностью с теоретическими и экспериментальными исследованиями, ранее полученными другими авторами;
- сходимостью расчетных данных имитационного моделирования с результатами проведенных экспериментальных исследований на уровне 90,31%.
- согласованностью поведения параметров АЭ сигналов для различных стадий притертости изделия;
- практической верификацией основных положений диссертации.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части пунктов 1, 2 и 3 её паспорта.

Публикация результатов исследования. По тематике диссертационного исследования всего опубликовано 19 работ, из них:

а) 11 квалификационных работ, опубликованных в соответствии с требованиями п. 11 «Положения о присуждении ученых степеней»:

– 5 статей [1-5] в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций диссертационных исследований по защищаемой специальности и отрасли наук журнал «Контроль. Диагностика» [1] (категория К1), журнал «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение» [2-4] (категория К2), журнал «Вестник МГТУ «СТАНКИН» [5] (категория К2));

– 6 патентов на изобретение [6-11], которые, в соответствии с п. 12.1 «Положения о присуждении ученых степеней», приравниваются к публикациям в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК;

б) 8 работ, опубликованных в сборниках статей и материалах конференций [12-19].

Личный вклад соискателя. Из представленных 19 работ 10 работ выполнены единолично, что подтверждает самостоятельность выполнения исследования и личное получение основных результатов работы. Автору принадлежат следующие результаты: анализ отечественного и зарубежного опыта разработки имитационных моделей процесса притирки, проведение физического и компьютерного экспериментов по съему припуска с контактных поверхностей в результате притирки, создание стенда для проведения экспериментальных исследований процесса ВСП, формирование концепции системы управления процессом ВСП. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работе [1] – самостоятельное проведение эксперимента по исследованию параметров АЭ в процессе притирки, организация процедуры измерения геометрических параметров сферического соединения; [5] – анализ алгоритмов имитационного моделирования, разработка алгоритма имитационного моделирования ВСП; [6-11] – разработка принципиальных кинематических схем и алгоритма работы технологического оборудования; [19] – анализ производственного технологического процесса, построение гипотезы, формирование концепции повышения эффективности процесса обработки.

Апробация результатов исследования. Промежуточные результаты исследования апробировались и обсуждались на 9 всероссийских и ведомственных научно-технических и научно-практических конференциях в 2020-2025 гг., проходящих в г. Москве, г. Санкт-Петербурге и г. Северодвинске:

1. XV «Национальная научно-техническая конференция»), ООО «СоюзМаш России», г. Москва, 2025 г.;

2. II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием “Balt tribo 2025”, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого Институт машиностроения, материалов и транспорта, г. Санкт-Петербург, 2025 г.;

3. Международная научно-технической конференция «ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ», ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, 2024 г.;

4. VI Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, 2024 г.;

5. XVII Всероссийская конференция с международным участием «МАШИНОСТРОЕНИЕ: традиции и инновации», ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», г. Москва, 2024 г.;

6. XV международная научно-техническая конференция «Трибология – машиностроению», Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, 2024 г.;

7. Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы и тенденции устойчивого развития науки, образования и производства (SDSEI - 2024)», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, 2024 г.;

8. Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы и тенденции устойчивого развития науки, образования и производства (SDSEI - 2023)», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, 2023 г.;

9. II Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ», ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Северодвинск, 2021 г.

Внедрение и реализация результатов исследования. Результаты проведенных исследований нашли прямое практическое применение при производстве судовых шаровых шарниров КФ6.367.002, -003 на предприятии АО «ПО «Севмаш» (АКТ №89.1340/3 от 16.01.2026 г.). Основные положения диссертации включены в образовательные программы ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». О использовании результатов свидетельствуют соответствующие акт внедрения (АКТ №7-н от 28.01.2026 г.).

Исследование получило государственную поддержку в виде грантов от организации ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере»: договор № 1874ГССС15-L/88337 о предоставлении гранта на проведение НИР; договор № 17640ГУ/2022 о предоставлении гранта на проведение НИР.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из 207 страниц машинописного текста и включает введение, пять глав, заключение, список сокращений, список использованных источников и шесть приложений. Содержит 137 рисунков, 26 таблиц, 30 формул и 119 наименований использованных источников. Основное содержание изложено на 152 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, рассмотрена разработанность научной задачи на текущий момент, обозначены объект, предмет и цель исследования, сформулированы задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту, а также описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, приведены данные о публикациях результатов исследования и их апробации.

В первой главе на основе обзора и целенаправленного анализа научно-технической литературы было установлено, что притирка характеризуется как процесс сложного механического, физико-химического и химического съема припуска с поверхности детали под воздействием большого числа абразивных зерен и поверхностно-активных веществ. При этом основным механизмом съема припуска выступает механический процесс.

Производительность и качество процесса притирки зависят от множества факторов, которые принято разделять по следующим группам: технологические, динамические, кинематические и геометрические. В виду большого количества факторов процесс наладки

процесса притирки является весьма трудоемким. Также при наладке техпроцессов необходимо учитывать особенности процесса притирки.

К ключевым особенностям процесса притирки принято относить следующие. Первая особенность: инструмент комплексный и состоит из притира, абразивных зерен, рабочей жидкости. Однако есть исключение: при взаимной притирке отсутствует притир. Вторая особенность: при притирке вектор скорости обычно не постоянен. Третья особенность: при притирке свободным абразивом зерна могут обладать разной степенью подвижности. Четвертая особенность: при притирке действуют такие же факторы, что и при абразивном износе деталей машин при их эксплуатации. Пятая особенность: процесс притирки носит стохастический характер.

При ВСП необходимо обращать внимание на конструкторско-технологические требования обрабатываемого изделия, которые могут накладывать определённые ограничения на значение параметров процесса обработки. В ходе анализа источников были установлены следующие особенности свойственные ВСП. Первая особенность: максимально допустимый размер основных фракций абразива не должен превышать допуска на зазор в притираемой паре. Вторая особенность: рациональные значения скорости и давления для взаимной притирки меньше, чем для индивидуальной притирки. Третья особенность: необходим подбор режимов обработки с минимизацией эффекта шаржирования абразивных зерен. Четвертая особенность: невозможность обеспечения одинаковой линейной скорости притирки на всех участках притираемой поверхности из-за отсутствия поступательных движений. Пятая особенность: давление распределяется по поверхности не равномерно, что связано с формой контактирующих поверхностей деталей.

После анализа особенностей процесса притирки были рассмотрены основные методы повышения эффективности процесса притирки, такие как: метод разделения технологических операций, экспериментально-поисковый метод, метод математического моделирования процесса, метод мониторинга процесса обработки, комбинированный. Обзор современных литературных источников показал, что наибольшую популярность в последнее время приобрел метод математического САЕ-моделирования. Разработанные на основе этого метода имитационные модели позволяют проводить компьютерные эксперименты для поиска рациональных значений факторов процесса взаимной сферической притирки, поэтому данный метод лег в основу данного исследования. Однако такие модели требуют наладки при изменении технологических условий или конструктива притираемого изделия. Для дополнительного повышения эффективности в части определения качества сферического соединения было предложено производить мониторинг процесса обработки посредством контроля параметров АЭ. Предварительно проведенный анализ литературных источников продемонстрировал принципиальную возможность использования данного метода в рамках процесса ВСП.

Таким образом на основе анализа литературных источников и логических умозаключений был предложен новый метод повышения эффективности притирки, заключающийся в синтезе имитационного моделирования и динамического мониторинга АЭ. Мониторинг позволяет оценить качество сферического соединения на различных стадиях процесса притирки и работоспособность абразивной смеси, за счет чего обеспечивается своевременность прекращения обработки и возможность поддержания режущей способности инструмента. Также были определены конструктивные параметры типового изделия для исследования процесса ВСП.

Все вышесказанное позволило обосновать цель диссертационного исследования, выбрать методы исследования и поставить задачи исследования.

Во второй главе представлено формирование материально-технической базы для проведения натурных экспериментов по исследованию процесса ВСП. В ходе предварительного анализа было установлено, что в открытой продаже нет специализированного оборудования для взаимной притирки деталей трехкомпонентных

шаровых шарниров, а использование роботизированной руки имеет определенные сложности при согласовании с системой мониторинга. Поэтому было принято решение о разработке специализированного станда для ВСП деталей шаровых шарниров.

Разработка притирочного станда состояла из последовательного выполнения следующих этапов проектных и технологических работ: декомпозиция состава станда, разработка кинематической схемы, 3D-моделирование станда, разработка программного комплекса управления стандом, сборка и наладка станда. В ходе проработки последующих этапов производилось уточнение предыдущих и по необходимости вносились изменения.

На первом этапе разработки станда был сформирован его компонентный состав. На основе проведенного анализа существующих конструкций притирочных станков была произведена декомпозиция первого уровня для проектируемого станда. Были определены ключевые системы станда, описан их компонентный состав и функции. Полученный результат декомпозиции представлен в табл. 1.

Таблица 1 – Декомпозиция притирочного станда

Состав	Элементы	Функции
Система главных движений	Несущие элементы, подвижные органы, приводы и крепеж	Осуществление движений притирки, установка шарнира
Корпус	Рама, опоры, ролики и крепеж	Формирование несущей конструкции станда
Система оказания давления	Рычаги, грузы, лапы, шарниры и крепеж	Оказание давления в зоне притирки с возможностью регулирования
Система управления и контроля	Плата, датчик, кабели, регуляторы и крепеж	Осуществление контроля притирки и согласование систем станда
Система наладки	Регулировочные звенья и крепеж	Настройка и наладка системы под разный типоразмер шарниров

Далее была разработана принципиальная кинематическая схема, которая проектировалась в несколько этапов с анализом возможных вариантов. Итоговые варианты кинематических схем были запатентованы [6-11].

После разработки кинематической схемы были определены виды комплектующих, стандартные изделия и формы фасонного проката для последующего изготовления станда. Корпусные конструкции и несущие элементы станда было решено изготавливать из профильного алюминиевого проката в силу малого удельного веса проката, высокой обрабатываемости и наличия унифицированных пазов под крепежные изделия. Конкретный вид профиля выбирался по мере проектирования. Проектирование велось от выходного звена, определяющего габариты зоны обработки, до корпуса станда с постепенным увеличением жесткости компонентов. На первом этапе был разработан привод собственного вращения, так как он является выходным звеном системы главных движений станда. В состав привода также был предусмотрен датчик силы для обеспечения контроля момента сил трения в шаровом шарнире. Далее был разработан привод нутации и прецессии. Все компоненты привода нутации и прецессии расположены на вращающейся консоли. Помимо двух приводов на консоли смонтирован блок управления стандом, который подключается к персональному компьютеру (далее – ПК) посредством беспроводного канала связи Wi-Fi по стандарту IEEE 802.11ac. Далее была спроектирована рама станда и система оказания давления.

Полученная 3D-модель станда представлена на рис. 1. При разработке 3D-модели станда также был произведен анализ собираемости станда и проверка на наличие пересечений компонентов сборки, которые подтвердили возможность изготовления физического образца.

На основе полученных 3D-моделей были выпущены чертежи рабочей конструкторской документации на сборочные узлы и уникальные детали, подлежащие механической обработке и 3D-печати.

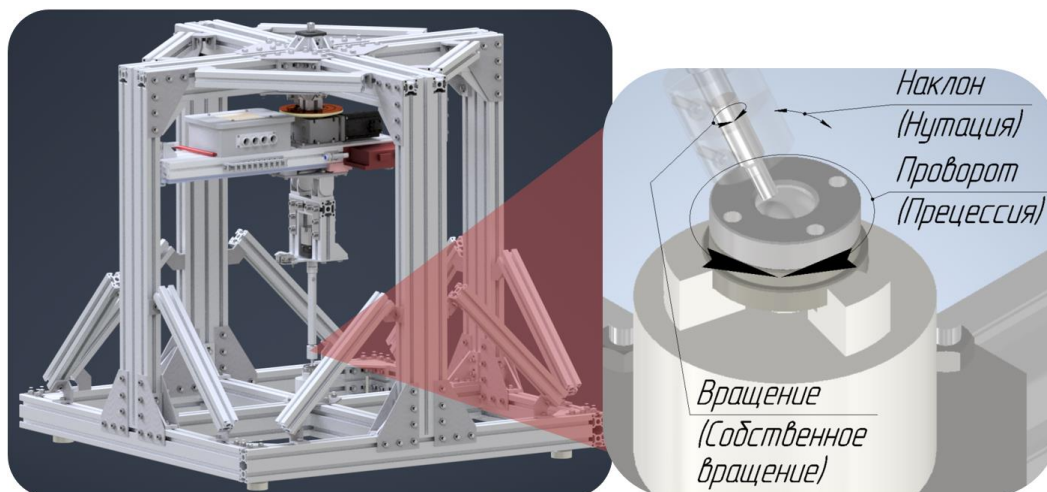


Рисунок 1 – Притирочный стенд

Далее выполнялись параллельные задачи по изготовлению стенда и разработке программного обеспечения (далее – ПО) для управления стендом. Разработанное ПО состоит из трех компонентов: ПО пользовательское; ПО передачи информации; ПО контроллера системы управления. Пользовательское ПО предназначено для взаимодействия пользователя со стендом. ПО для передачи информации предназначено для считывания и отправки управляющих команд с ПК на стенд и обратной передачи информации о положении приводов стенда. ПО контроллера системы управления предназначено для непосредственного управления рабочими органами стенда.

Параллельно с разработкой ПО управления стендом выполнялись работы по изготовлению уникальных деталей. Обработка уникальных деталей осуществлялась на универсальном оборудовании и станках с числовым и программным управлением (далее – ЧПУ). Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ производилась в ПО Esprit. Для деталей, подлежащих обработке в два установка, предварительно изготавливались базирующие элементы типа подложки. Пример управляющей программы и обработанной детали представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

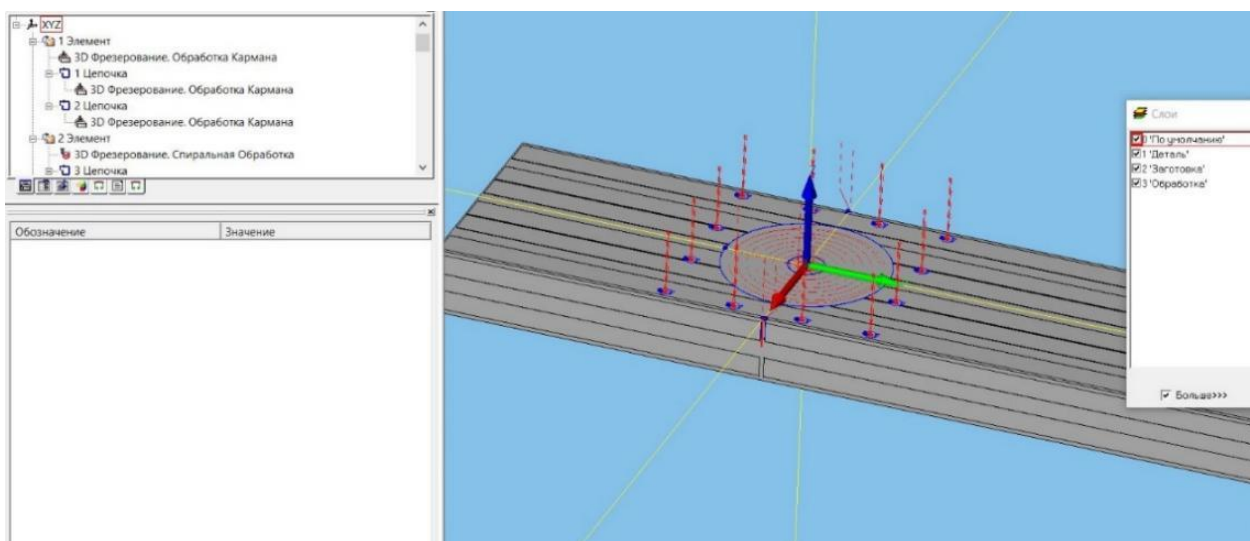


Рисунок 2 – Управляющая программа обработки консоли



Рисунок 3 – Консоль привода нутации и прецессии

Следующим этапом разработки стенда была сборка узлов стенда и блочно-агрегатная сборка всех систем стенда. Сборка производилась посредством свинчивания резьбовых поверхностей и прессовых посадок. Регулировка взаимного положения по неподвижным стыкам производилась посредством дистанционных шайб и подкладок. Для большей мобильности стенда было принято решение о замене виброопор на опорные колеса со стопорами. Результат сборки стенда и образца шарнира представлены на рис. 4 [12]. После сборки проходил этап наладки рабочих органов стенда. Для оценки работоспособности приводов стенда было произведено их тестирование в рабочих условиях.

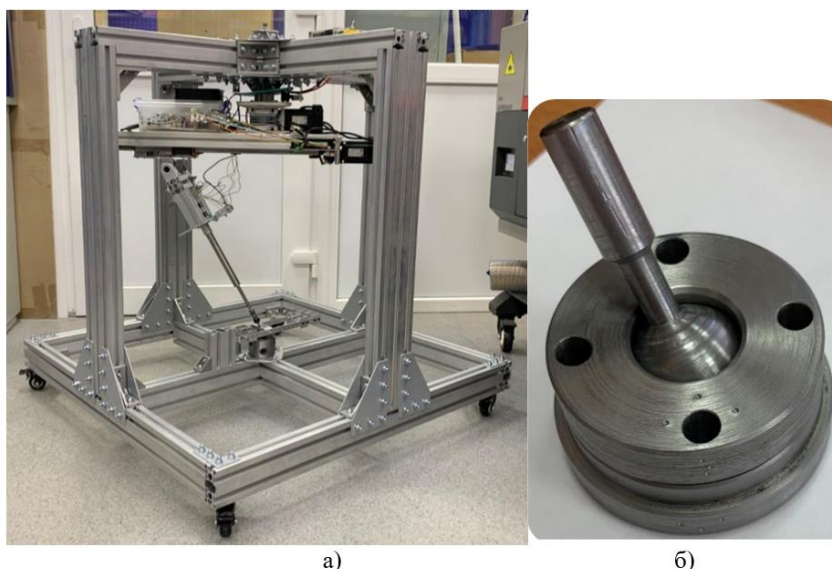


Рисунок 4 – Материально техническое оснащение для процесса ВСП:
а – притирочный стенд; б – шаровой шарнир

Разработанный стенд позволяет производить экспериментальные исследования процесса ВСП для оценки характера съема припуска с контактных поверхностей деталей шаровых шарниров при различных значениях параметров процесса ВСП. В предложенном стенде используются программно-управляемые приводы, позволяющие реализовать независимую кинематику трех видов сферического движения: прецессии, нутации и собственного вращения. Полученный конструктив стенда позволяет производить обработку трехкомпонентных шаровых шарниров с максимальным углом наклона шарового пальца от вертикального положения до 30 градусов.

Также при формировании материально-технической базы были определены средства измерения. Для выполнения измерений размеров и геометрических характеристик использовались контактные измерительные средства. Измерение ВА сигналов производилось с помощью виброизмерительной аппаратуры. Все средства измерений сертифицированы и проходят периодическую поверку.

Для проведения высокоточных измерений размеров и геометрических характеристик сферических поверхностей деталей шарнира до и после проведения опытов была выбрана координатно-измерительная машина (далее – КИМ). В качестве КИМ использовалась машина фирмы Carl Zeiss, модель Prismo Navigator 9/12/7.

Измерение ВА параметров, возникающих в сферическом соединении в процессе притирки, производились при помощи измерительной ВА аппаратуры фирмы Brüel & Kjaer. Также были определены сторонние измерительные средства для измерения времени, шероховатости поверхности и усилия вращения шарнира.

Третья глава посвящена созданию имитационной модели процесса ВСП. При выборе инструментария имитационного моделирования был проведен сравнительный анализ существующих программных продуктов, позволяющих разработать модель. Анализ показал, что наиболее целесообразным способом является разработка собственного приложения на открытых языках программирования. Это объясняется тем, что в имеющихся ПО существует ряд ограничений по чтению данных измерений, полученных с измерительного оборудования, и с зависимостью от прикладных библиотек. В качестве языков программирования были выбраны PHP и JavaScript.

Перед началом разработки приложения имитационного моделирования была проанализирована предметная область ВСП по основным аспектам процесса обработки. Также были определены основные факторы процесса ВСП такие как кинематика, давление и параметры абразивной смеси. Выделенные основные факторы были учтены при разработке приложения.

В результате анализа кинематики сферического движения разработанного стенда было доказано, что полученное оборудование имеет независимую кинематику трех видов сферического движения по способу описания Л. Эйлера. За счет этого для перемещения шарового пальца из произвольного начального положения в конечное требуется лишь повернуть каждый привод на соответствующий ему угол приращения с учетом коэффициента редукции.

В ходе анализа распределения давления в сферическом соединении были рассмотрены различные подходы к описанию данного явления. Было решено использовать модель гидравлического взаимодействия тел. При таком подходе детали шарнира рассматриваются как сплошные среды металлической плотности, а в качестве эквивалента силового воздействия выступает объем взаимного проникновения сферических поверхностей деталей.

После проведенного анализа выполнялся этап разработки приложения имитационного моделирования. Основу разработанного приложения составляет программа «Имитационное моделирование ВСП», в которой производится расчет съема припуска с обрабатываемых поверхностей деталей шарового шарнира в процессе ВСП по модифицированному уравнению Ф.В. Престона. Полученная программа работает по следующему алгоритму:

1. Генерация сферических контактных поверхностей деталей шарнира.
2. Смещение поверхностей крышки и подпятника до обеспечения контакта с поверхностью шарового пальца.
3. Силовой расчет локальных результирующих сил, действующих на контактные поверхности деталей шарнира.
4. Кинематический расчет линейных перемещений элементарных сегментов сферической поверхности.
5. Радиальный съем припуска с сферических поверхностей деталей шарнира по модифицированному уравнению Престона.

При генерации сферических поверхностей деталей сферического соединения используются данные результатов измерения на КИМ физических образцов шарниров, которые впоследствии использовались при проведении физического эксперимента. Полученные сферические поверхности представляют собой наборы строго упорядоченных элементарных сферических сегментов равной площади. Такой подход позволяет упростить процедуру дальнейших расчетов.

Этап смещения поверхностей крышки и подпятника заключается в перемещении сферических поверхностей крышки и подпятника на величину минимального вертикального зазора и дополнительного заглубления. Как результат образуются зоны взаимопроникновения

поверхностей крышки и подпятника с поверхностью шарового пальца. Расчет смещения производится согласно формуле среднего взвешенного значения:

$$\delta Z_{(k,n)(k,n)пр.Z} = \sum_{ii=0}^1 \sum_{jj=0}^1 (Z_{(i+ii,j+jj)} - Z_{(k,n)}) \cdot w_{(i+ii,j+jj)} / \sum_{ii=0}^1 \sum_{jj=0}^1 w_{(i+ii,j+jj)} + d \quad (1)$$

где $Z_{(i+ii,j+jj)}, Z_{(k,n)}$ – координата Z точки крышки $(i+ii,j+jj)$ и пальца (k,n) соответственно, мм; d – дополнительное смещение, зависящее от параметров абразивной смеси, мм; $w_{(i+ii,j+jj)}$ – степень влияния точки крышки $(i+ii,j+jj)$ на величину вертикального зазора, мм⁻¹.

Степень влияния точки крышки зависит от расстояния до точки пальца и рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{(i,j)} = 1 / l_{(k,n)(i,j)пр.XY}, \quad (2)$$

где $l_{(k,n)(i,j)пр.XY}$ – длина проекции на плоскость XY отрезка между точками крышки (i,j) и пальца (k,n) , мм.

Этап силового расчета заключается в определении результирующей силы, действующей на сегмент пальца, находящийся в зоне его пересечения с сегментом крышки или подпятника, которая эквивалентна объему проникновения поверхностей и величине ответного взаимодействия. Для удобства выполнения расчета объема пересечения необходимо, чтобы сферические сегменты крышки и подпятника были условно эквидистантными относительно элементарных сегментов поверхности пальца, поэтому на первом этапе строится эквивалентная сферическая поверхность (рис. 5).

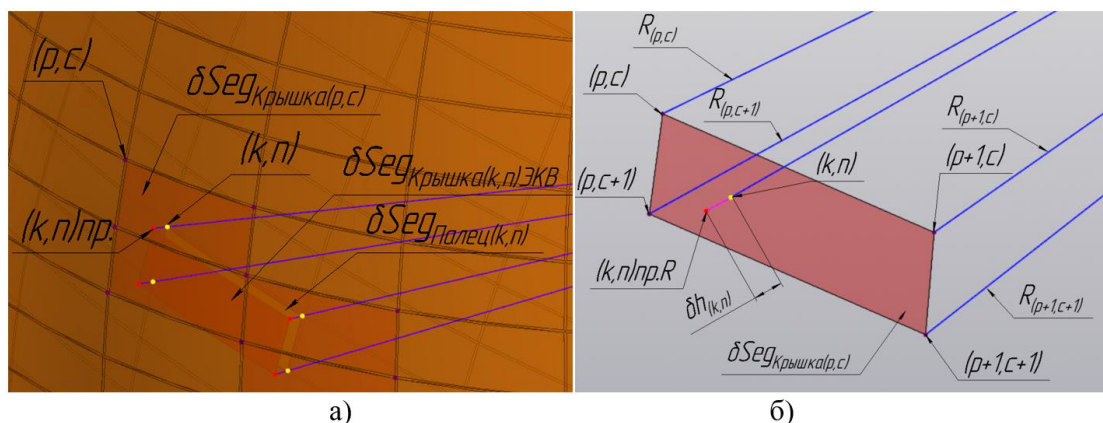


Рисунок 5 – Генерация эквивалентной поверхности: а – общий вид; б – радиальный зазор

Построение эквивалентной поверхности производится по вершинам радиальных зазоров между поверхностями деталей согласно следующей формуле:

$$\delta h_{(k,n)} = \sum_{pp=0}^1 \sum_{cc=0}^1 (R_{(p+pp,c+cc)} - R_{(k,n)}) \cdot w_{(p+pp,c+cc)} / \sum_{pp=0}^1 \sum_{cc=0}^1 w_{(p+pp,c+cc)}, \quad (3)$$

где $R_{(p+pp,c+cc)}, R_{(k,n)}$ – радиус точки крышки $(p+pp,c+cc)$ и пальца (k,n) соответственно, мм; $w_{(p+pp,c+cc)}$ – степень влияния точки крышки $(p+pp,c+cc)$ на величину радиального зазора, рад⁻¹.

Степень влияния конкретной точки крышки зависит от расстояния до точки пальца и рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{(p,c)} = 1 / (R_{(k,n)}, \overline{R_{(p,c)}}). \quad (4)$$

Расчет объема проникновения (рисунок 6(б)) производится методом объемного интегрирования согласно следующей формуле:

$$V = \iiint_G dx dy dz, \quad (5)$$

где G – область определения интеграла, соответствующая условию $R_{\text{Пальца}} > R_{\text{Крышки}}$.

Далее производится расчет силы прямого воздействия на каждый сегмент контактной поверхности шарового пальца пропорционально доле объема пересечения сегмента от общего объема пересечения в зоне контакта крышки или подпятника с шаровым пальцем согласно следующей формуле:

$$F_{(k,n)} = F \cdot \delta V_{(k,n)} / V, \quad (6)$$

где F – вертикальная сила, приложенная к крышке шарнира, Н; $\delta V_{(k,n)}$ – объем пересечения для элементарного сегмента поверхности пальца (k,n) , мм³.

Затем, для обеспечения баланса сил в соединении, выполняется расчет ответного силового воздействия по диаметрально противоположной части сферической поверхности шарового пальца, которая представляет собой полусферу (рис. 6а) по следующей формуле:

$$F_{(b,m)}^* = F_{(k,n)} \cdot \delta V_{(b,m)} \cdot \cos(\gamma_{(b,m)}) / \sum_{b=0} \sum_{m=0} \delta V_{(b,m)} \cdot \cos(\gamma_{(b,m)}), \quad (7)$$

где $\delta V_{(b,m)}$ – объем пересечения для диаметрально противоположного к сегменту (k,n) элементарного сегмента поверхности пальца (b,m) , мм³; $\gamma_{(b,m)}$ – угол между нормальными сегментов (k,n) и (b,m) , рад.

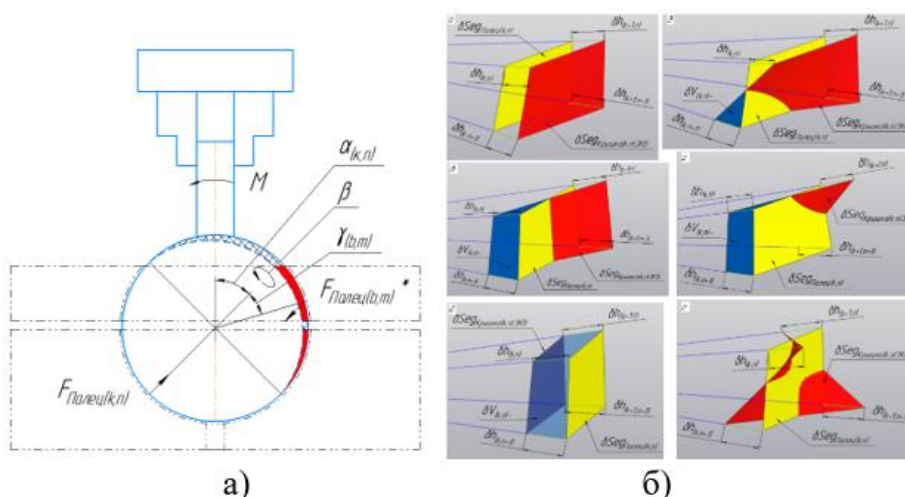


Рисунок 6 – Схема силового взаимодействия в шарнире:
а – общий вид баланса сил; б – варианты объемов проникновения

Результирующая сила, действующая на сегмент, рассчитывается как полу сумма силы прямого и ответного взаимодействия.

Расчет движения крышки и подпятника относительно шарового пальца производится посредством первичного разложения вектора мгновенной оси вращения по составляющим на оси системы координат шарнира. Затем выполняется расчет трех элементарных поворотов подпятника и крышки относительно их базового положения.

Далее производится расчет средней величины элементарного перемещения сегмента по формуле:

$$L_{\text{Cер}(k,n)} = \sum_{kk=0}^1 \sum_{nn=0}^1 L_{(k+kk,n+nn)} / 4, \quad (8)$$

где $L_{(k,n)}$ – перемещение точки (k,n) пальца, которое рассчитывается по формуле длины разности векторов, мм.

На заключительном этапе производится расчет величины элементарного радиального съема припуска с сегментов контактной сферической поверхности детали шарнира следующим образом:

$$H_{\text{Cер}(k,n)} = k \cdot F_{\text{Пез}(k,n)} \cdot L_{\text{Cер}(k,n)}, \quad (9)$$

где k – эмпирический коэффициент Престона, который зависит от технологических факторов и определяется по результатам экспериментального исследования, Н⁻¹; $F_{\text{Пез}(k,n)}$ – результирующая сила, действующая на сегмент, Н; $L_{\text{Cер}(k,n)}$ – перемещение сегмента, мм.

Для обеспечения работоспособности программы также были созданы дополнительные программы, которые в своей совокупности образуют аппаратно-программный комплекс (далее – АПК) информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования ВСП. В состав АПК входит 5 программ, описание и функционал которых приведены в табл. 2. Разработанный АПК является основой для создания системы управления процессом ВСП, которая позволит определять и генерировать рациональные стратегии обработки изделий со сферическим соединением деталей.

Таблица 2 – Программы АПК

№	Название	Предназначение
1	Измерение геометрических характеристик деталей на КИМ	В программе задается стратегия измерения и формируется управляющая программа для КИМ.
2	Визуализация и первичная аналитика	В программе производится анализ исходных данных результатов измерения на КИМ и оценка пригодности данных для имитационного моделирования процесса ВСП.
3	Имитационное моделирование ВСП	В программе производится расчет съема припуска возникающего в ходе реализации процесса ВСП.
4	Организация и управление стратегией экспериментальных исследований	В программе производится проведение компьютерного эксперимента по имитационному моделированию процесса ВСП
5	Визуализация и аналитика результатов практики и моделирования	В программе производится сравнение и оценка сходимости результатов имитационного моделирования с результатами экспериментальных исследований процесса ВСП

В четвертой главе изложено планирование и проведение эксперимента по исследованию съема припуска с контактных поверхностей сферического соединения в процессе ВСП для установления связи кинематических параметров процесса ВСП с качеством обрабатываемых контактных сферических поверхностей деталей шарового шарнира. При планировании эксперимента были учтены рекомендации по значению параметров процесса ВСП из научно-технической литературы, а также данные предварительно проведенного кинематического моделирования процесса ВСП [3]. В результате были определены 5 стратегий обработки, которые носят разный характер распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей сферического соединения. В качестве абразивной смеси использовалась алмазная паста АСМ 7/5 НОМ. Материал деталей шарнира – сталь 20 ГОСТ 1050-2013.

По результатам проведенных опытов было установлено, что в процессе притирки происходит постепенное уменьшение среднего радиуса сферического соединения и увеличение отклонения от сферичности у шарового пальца при наличии первичного избыточного зазора в соединении, что согласуется с представлениями о физике протекания процесса съема припуска. Также было установлено, что на характер съема припуска с поверхности оказывает влияние изменение направления вектора результирующей скорости притирки, из-за которого происходит перераспределение абразивной смеси в зоне обработки. Значения достигнутых геометрических параметров сферического соединения для каждого шарнира приведено в табл. 3.

Таблица 3 – Геометрические параметры сферического соединения после притирки

№ образца шарнира	Параметр сферического соединения		
	Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
1	9,9797	58,2	43,7
2	10,002	38,1	33,0
3	9,9792	35,3	68,8
4	9,9688	36,9	60,0
5	9,9688	38,5	71,3

Затем был определен характер съема припуска с сферических поверхностей деталей шаровых шарниров при различных стратегиях обработки. При этом установлено, что

что на начальном периоде времени избыток жидкой фазы в абразивной смеси играет в образовании силового контакта сравнительно большую роль. К середине технологического перехода происходит резкий рост амплитуд, который в дальнейшем достигает насыщения и даже снижается к концу перехода. Такое поведение амплитуд объясняется перераспределением жидкой составляющей абразивной смеси в зоны повышенного зазора и уплотнений контакта. При этом происходит плавный переход преимущественно к абразивному трению с более интенсивной потерей режущей способности абразива.

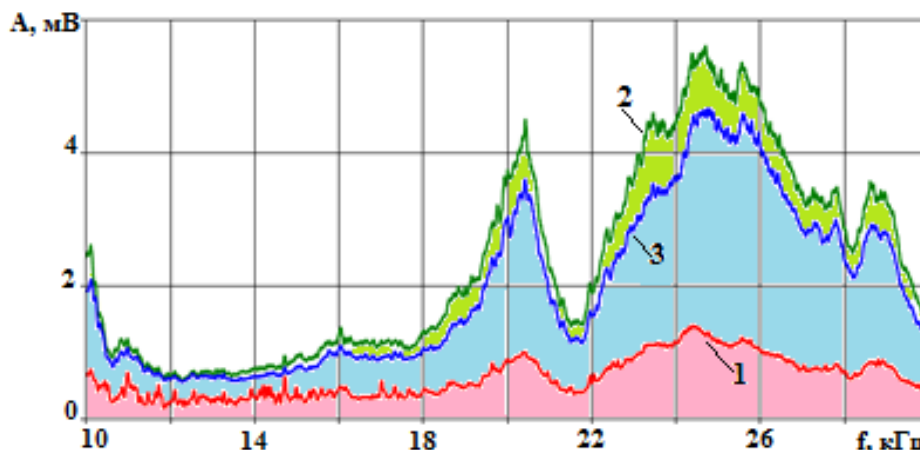


Рисунок 9 – Амплитудные спектры АЭ для разных моментов времени на первом переходе ВСП: 1 – спектр АЭ в начале перехода после заправки узла новой абразивной смесью; 2 – спектр АЭ в середине перехода; 3 – спектр АЭ к концу перехода

На графике рис. 10 видно, что амплитуды максимумов в несколько раз превышают соответствующие СКЗ амплитуды. Рост максимальных значений по отношению к СКЗ амплитуд в ряде случаев дает дополнительную информацию о ходе процесса. На рис. 11 в виде графиков собраны сведения о СКЗ и максимальных значениях амплитуд для первого и четвертого перехода. На представленных графиках цифры 1 и 4 означают номер перехода. Графики построены для двух частотных диапазонов, выделенных на рис. 10.

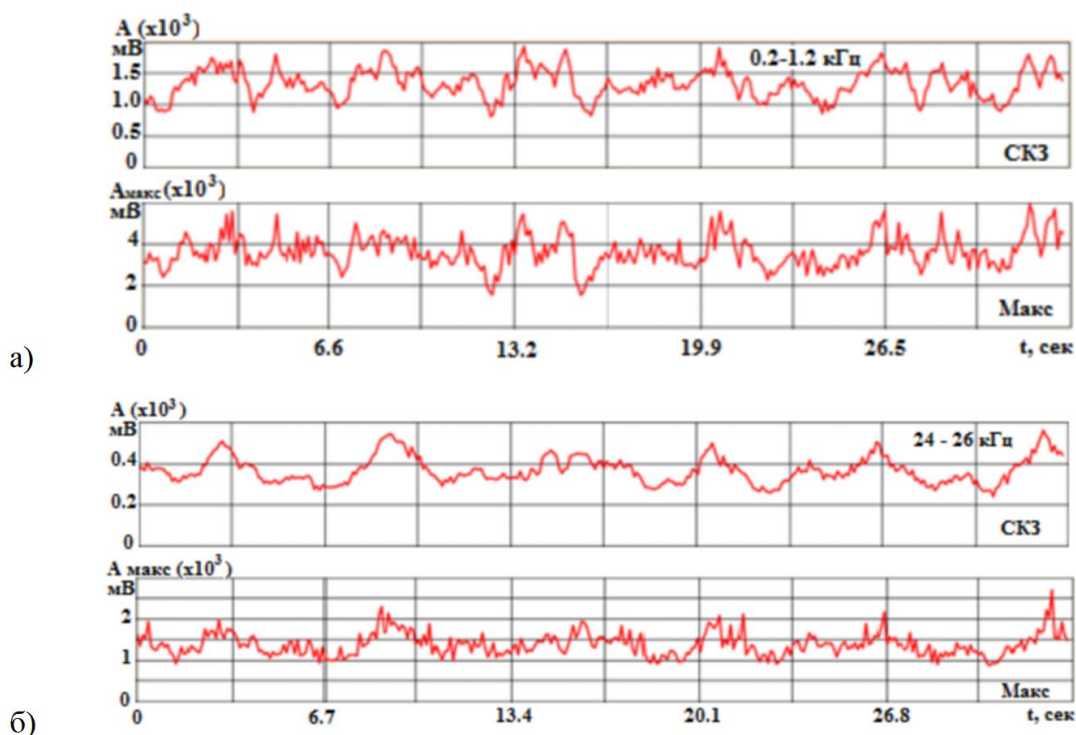


Рисунок 10 – Изменения СКЗ и пиковых огибающих сигналов АЭ в двух частотных диапазонах в конце первого технологического перехода: а – 0,2...1,2 кГц; б – 24...26 кГц

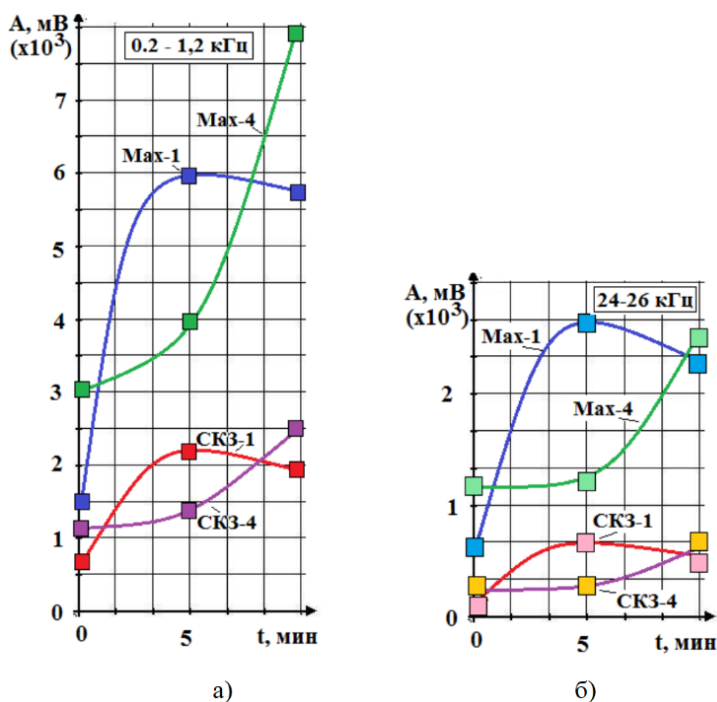


Рисунок 11 – Изменения СКЗ и максимальных значений амплитуд на 1-м и 4-м технологических переходах в диапазонах частот: а – 0,2...1,2 кГц; б – 24...26 кГц

Также было установлено, что резкий скачок с повышением уровней пиковой огибающей СКЗ при сохранении образовавшихся уровней во времени свидетельствует об образовании явления шаржирования абразивного зерна в контактную сферическую поверхность детали шарнира (рис. 11). При этом зерно фиксируется в теле детали, и вместо перекатывания по притираемой поверхности начинает вести себя подобно рецу. Возникающие направленные кольцевые периодические риски на обрабатываемых поверхностях деталей подтверждают явление шаржирования абразивных зерен при обработке.

В качестве диагностического показателя отношения амплитуд сигналов АЭ в диапазонах НЧ (0,2...1,2 кГц) и ВЧ (24...26 кГц) был определен параметр K_{F2} . Установлено, что увеличение площади пятна контакта ведет к распределению внешней нагрузки по большей площади. Как следствие возникает снижение плотности передаваемой мощности АЭ, что отображается в увеличении значения параметра K_{F2} (рис. 12). Предложенный параметр позволяет повысить управляемость процессом ВСП за счет своевременного выявления информации о состоянии качества обрабатываемого изделия и получаемом пятне контакта в сферическом соединении. Апробация мониторинга параметра K_{F2} в производственных условиях продемонстрировала сокращение брака при реализации процесса ВСП на 7–9 %. На предложенный способ мониторинга была подана заявка на изобретение № 2026105662 от 03.03.2026 г.

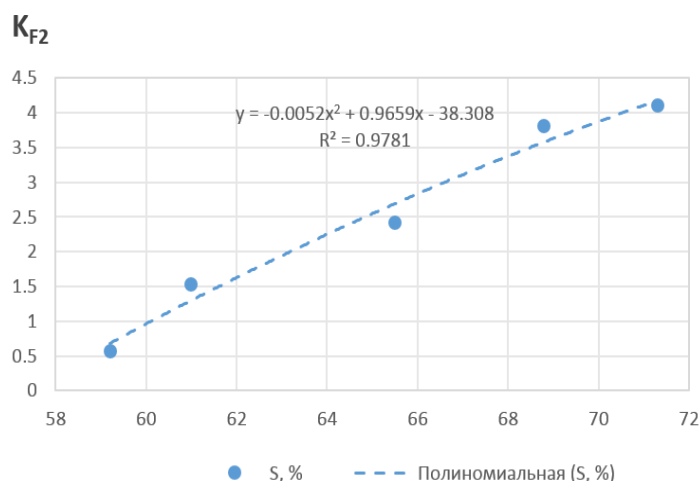


Рисунок 12 – График зависимости параметра K_{F2} от площади пятна контакта в сферическом соединении

Полученные результаты легли в основу практических рекомендаций по использованию параметров ВА сигнала в процессе ВСП и служат базой для создания автоматизированной системы управления процессом ВСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе анализа технической литературы, экспериментальных и теоретических исследований была достигнута цель, заключающаяся в повышении эффективности процесса взаимной сферической притирки за счет улучшения ее управляемости посредством имитационного моделирования и мониторинга параметров акустической эмиссии в процессе обработки.

К основным итоговым выводам по результатам диссертационного исследования относится следующее:

1. На основе анализа литературных источников и логических умозаключений был предложен новый метод повышения эффективности притирки, заключающийся в синтезе имитационного моделирования и динамического мониторинга вибрационного параметра, позволяющий повысить производительность на 8–15 % и сократить уровень производственного брака на 7–9 % за счет своевременного прекращения обработки изделия.

2. Для проведения экспериментальной части исследования был разработан, создан и налажен специализированный стенд, позволяющий реализовать процесс ВСП с независимой кинематикой трех видов сферического движения: прецессии, нутации и собственного вращения. Благодаря стенду удалось установить наличие случайного фактора процесса ВСП – распределение абразивной смеси в зоне обработки. Предложенная конструкция стенда была запатентована.

3. Было разработано приложение имитационного моделирования процесса ВСП, представляющее собой АПК информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования процесса ВСП, которое позволяет осуществлять планирование и проведение компьютерных экспериментов, сравнение результатов практических и модельных исследований, анализировать стратегии обработки в части получаемого качества изделия со сферическим соединением и характера пятна контакта в соединении. Общая средняя сходимость результатов имитационного моделирования с данными экспериментальных исследований составила более 90 %, что подтверждает возможность использования разработанной имитационной модели для задачи прогнозирования результатов процесса ВСП.

4. В результате исследования съема припуска с контактных поверхностей сферического соединения в процессе ВСП при различных стратегиях обработки было установлено, что локализация съема припуска с образованием пятен контакта коррелирует с расположением участков увеличенного пройденного пути, полученных при предварительном моделировании кинематики стратегии обработки. Для рассматриваемого в исследовании шарового шарнира лучшими показателями по характеру изменения пятна контакта в соединении обладает стратегия, в которой значения скоростей сферического движения прецессии, нутации и собственного вращения находятся во взаимном отношении, равном $4/1/-2$ соответственно.

6. В результате исследования параметров ВА сигнала в сферическом соединении в процессе ВСП при различных стратегиях обработки и условиях контакта было установлено, что имеется однозначная связь между параметрами АЭ и качеством обрабатываемого изделия. В качестве диагностического показателя отношения амплитуд сигналов АЭ в диапазонах НЧ и ВЧ был предложен параметр K_{F2} . При увеличении площади пятна контакта происходит снижение плотности передаваемой мощности АЭ, что отображается в увеличении значения параметра K_{F2} . Также было отмечено, что резкий скачок с повышением уровней огибающей СКЗ при сохранении образовавшихся уровней во времени свидетельствует об образовании явления шаржирования абразивного зерна в контактную сферическую поверхность детали шарнира.

7. На основе полученных результатов исследования параметров ВА сигнала были сформированы практические рекомендации и предложения для машиностроительных производств, являющиеся основой для последующего создания технологического

оборудования, способного функционировать без вмешательства оператора. Показано, что мониторинг позволяет оценить качество сферического соединения на различных стадиях процесса притирки и работоспособность абразивной смеси, за счет чего обеспечивается своевременность прекращения обработки и поддержание режущей способности инструмента.

8. Результаты проведенных исследований нашли прямое практическое применение при производстве судовых шаровых шарниров КФ6.367.002, -003 на предприятии АО «ПО «Севмаш». Основные положения диссертации включены в образовательные программы ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова». Об использовании результатов свидетельствуют соответствующие акты внедрения.

Полученные результаты исследования позволяют повысить управляемость процессом ВСП и имеют существенное значение для создания автоматизированной системы управления процессом ВСП в машиностроительном производстве.

Основными научными направлениями дальнейшего развития диссертационного исследования являются:

1. Учет факторов материала деталей и параметра вида абразивной смеси при модернизации имитационной модели процесса ВСП;
2. Разработка и оптимизация алгоритма поиска рациональных стратегий обработки для расширенного класса изделий со сферическим соединением;
3. Замена прямых контактных измерений геометрии поверхностей деталей сферического соединения косвенными измерением посредством ВА сигнала;
4. Разработка блока мониторинга в структуре АПК для динамического контроля состояния качества обрабатываемого изделия и корректировки управляющей программы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях ВАК

1. Козочкин, М.П. Исследование связей параметров акустической эмиссии со стадиями процесса взаимной сферической притирки деталей шарнира [Текст] / М.П. Козочкин, **В.А. Клачков** // Контроль. Диагностика. — 2025. — Т. 28, № 12. — С. 51–62. — DOI: 10.14489/td.2025.12.pp.051-062.
2. **Клачков В.А.** Исследование процесса взаимной сферической притирки. Постановка проблемы [Текст] / **В.А. Клачков** // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2023. – № 4(76). – С. 69-75. – DOI 10.6060/snt.20237604.0009.
3. **Клачков В.А.** Исследование распределения пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарнира при технологическом процессе взаимной сферической притирки [Текст] / **В.А. Клачков** // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2025. – № 1(81). – С. 94-105. – DOI 10.6060/snt.20258101.00011.
4. **Клачков В.А.** Исследование характера износа поверхности при взаимной сферической притирке [Текст] / **В.А. Клачков** // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2022. – № 3(71). – С. 51-58. – DOI 10.6060/snt.20227103.0006.
5. **Клачков, В.А.** Исследование технологического процесса притирки шаровых шарниров: подходы к созданию имитационной модели рабочего процесса [Текст] / **В.А. Клачков, М.П. Худяков** // Вестник МГТУ "СТАНКИН". – 2025. – № 2(73). – С. 66-79.

Патенты:

6. Патент № 2 772 527 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025 (2012.01), В24В 29/04 (2006.01), В24В 51/00 (2006.01), В24В 11/00 (2006.01). Станок для совместной автоматизированной притирки деталей шарниров шаровых: № 2021123262: заявл. 04.08.2021: опубл. 23.05.2022 / **Клачков В.А.**, Худяков М.П.; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова». – 2 ил.

7. Патент № 2 797 801 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025 (2012.01), В24В 29/04 (2006.01), В24В 51/00 (2006.01), В24В 11/00 (2006.01). Станок для взаимной автоматизированной притирки деталей шарового шарнира: № 2022129719: заявл. 16.11.2022: опубл. 08.06.2023 / Григорьев С.Н., Козочкин М.П., **Клачков В.А.**; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»). – 3 ил.

8. Патент № 2 797 803 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025 (2012.01), В24В 29/04 (2006.01), В24В 51/00 (2006.01), В24В 11/00 (2006.01). Станок для взаимной автоматизированной притирки деталей шарового шарнира: № 2022129720: заявл. 16.11.2022: опубл. 08.06.2023 / Григорьев С.Н., Козочкин М.П., **Клачков В.А.**; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»). – 3 ил.

9. Патент № 2 797 804 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025 (2012.01), В24В 29/04 (2006.01), В24В 51/00 (2006.01), В24В 11/00 (2006.01). Станок для взаимной автоматизированной притирки деталей шарового шарнира: № 2022129721: заявл. 16.11.2022: опубл. 08.06.2023 / Григорьев С.Н., Козочкин М.П., **Клачков В.А.**; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»). – 3 ил.

10. Патент № 2 797 805 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025 (2012.01), В24В 29/04 (2006.01), В24В 51/00 (2006.01), В24В 11/00 (2006.01). Станок для взаимной автоматизированной притирки деталей шарового шарнира: № 2022129722: заявл. 16.11.2022: опубл. 08.06.2023 / Григорьев С.Н., Козочкин М.П., **Клачков В.А.**; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»). – 3 ил.

11. Патент № 2811620 С1 Российская Федерация, МПК В24В 37/025, В24В 29/04, В24В 51/00. Мобильный станок для взаимной автоматизированной притирки деталей шарового шарнира: № 2023124716: заявл. 26.09.2023: опубл. 15.01.2024 / **В.А. Клачков**, М.П. Худяков, С.А. Русановский; патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова». – 1 ил.

Публикации в других изданиях:

12. **Клачков В.А.** Станок для взаимной сферической притирки деталей шарового шарнира // *Материалы международной научно-технической конференции «ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРИЯ ПОВЕРХНОСТИ 2024»: сборник трудов; ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». – Москва: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2024. – С. 156-163. – ISBN 978-5-7028-0811-6.*

13. **Клачков В.А.** Исследование математических моделей процесса притирки // *Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 18–30 ноября 2024 года. – Архангельск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2025. – С. 595-600.*

14. **Клачков В.А.** Подход к имитационному моделированию процесса притирки деталей шарового шарнира // *Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALT TRIBO 2025 : сборник статей Всероссийской с международным участием научной конференции, Санкт - Петербург, 19–20 июня 2025 года. – Санкт - Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2025. – С. 67-74. – DOI 10.18720/SPBPU/2/id25-48.*

15. **Клачков В.А.** Алгоритм имитационного моделирования эксплуатационного износа шарового шарнира // *Трибология – машиностроению: Труды XV Международной*

научно-технической конференции, Москва, 12–13 ноября 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 105-107.

16. **Клачков В.А.** Алгоритм имитационного моделирования технологического процесса взаимной притирки компонентов шарового шарнира // Машиностроение: традиции и инновации: Материалы XVII Всероссийской конференции с международным участием, Москва, 28 октября – 01 ноября 2024 года. – Москва: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2024. – С. 148-160.

17. **Клачков В.А.** Исследование основных факторов производительности и качества процесса притирки // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых – 2023: Сборник материалов конференции: в 2-х томах, Архангельск, 01–30 апреля 2023 года / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Том 2. – Архангельск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 297-302.

18. **Клачков В.А.** Разработка технологии и оборудования автоматизированной притирки изделий типа «Шарнир шаровой» // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 16–30 ноября 2020 года – Северодвинск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2021. – С. 36-40.

19. **Клачков, В.А.** Исследование технологического процесса изготовления изделия «Шарнир шаровой» / **В.А. Клачков, М.А. Кондаков, И.Д. Геффель** // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 18–30 ноября 2019 года. – Северодвинск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2020. – С. 37-40.

Научное издание

Клачков Владимир Андреевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ ПОСРЕДСТВОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И МОНИТОРИНГА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 21.04.2026.

Формат 60×90^{1/16}. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ __.

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