



Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П. А. Соловьева»

152934, Ярославская область, Рыбинский район,
город Рыбинск, улица Пушкина, 53

ОГРН: 1027601126057, ИНН: 7610029476, КПП: 761001001

Тел. +7 4855 23 97 22, факс: +7 4855 28 04 75

rector@rsatu.ru, www.rsatu.ru

12.05.2026 № 08/1516

Кому: В диссертационный совет 24.2.332.01,
созданный на базе ФГАОУ ВО «МГТУ
«СТАНКИН»

Ученому секретарю совета Сотовой Е.С.

Куда: 127055, г. Москва, Вадковский пер, д.1

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор

по науке и цифровой

трансформации РГАТУ

имени П.А. Соловьева

кандидат технических наук, доцент

А. Н. Сутягин

2026



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный
авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» на
диссертационную работу **Кlachкова Владимира Андреевича «Повышение
эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством
имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности: 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-
технической обработки

Актуальность темы диссертации

Изделия со сферическим соединением часто встречается в продукции,
относящейся к различным отраслям промышленности таким как:
автомобилестроение, станкостроение, судостроение, авиастроение и др.
Рациональность использования таких изделий обусловлена их компактностью,
высокой несущей способностью. Традиционно в качестве метода окончательной

обработки изделий со сферическим соединением используется взаимная сферическая притирка (ВСП) компонентов соединения. На качество обработки влияет большое количество факторов процесса ВСП. В работе Клячкова Владимира Андреевича предложен новый метод повышения эффективности процесса ВСП, который заключается в создании системы прогнозирования качества обработки ВСП для различных стратегий обработки. Создание таких технологий является **актуальной задачей**, так как способствует повышению качества обработки изделий со сферическим соединением и снижению уровня производственного брака.

Структура и содержание диссертации

Целью исследования является повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки за счет улучшения ее управляемости посредством имитационного моделирования и мониторинга параметров акустической эмиссии в процессе обработки.

Объём диссертационного исследования составляет 207 страниц и включает: введение, пять глав, заключение, список сокращений и шесть приложений и список использованных источников, который насчитывает 119 наименований. Текст работы содержит 137 рисунков и 26 таблиц и 30 формул.

Во введении отражена актуальность темы исследования, определены объект, предмет и цель работы, сформулированы задачи, основные защищаемые положения, научная новизна и значимость исследования, описаны методы исследования, приведены сведения о публикациях и апробации результатов.

В первой главе представлен анализ литературных источников по теме исследования. На основе анализа источников автором был предложен новый метод повышения эффективности притирки, который заключается в совместном использовании имитационного моделирования и динамического мониторинга акустической эмиссии (АЭ). В конце главы сформулированы задачи, которые необходимо решить для разработки предложенного метода.

Вторая глава посвящена формированию материально-технической базы для проведения физических экспериментов по исследованию процесса ВСП. Автор сначала разработал проект притирочного стенда для ВСП, после чего непосредственно собрал и наладил стенд. Конструкцию стенда автор впоследствии запатентовал.

Далее автор определил необходимые стандартные средства измерения для проведения физических исследований. Для высокоточных геометрических контактных измерений автор использовал координатно-измерительную машину (КИМ) фирмы Carl Zeiss, а для записи виброакустического сигнала виброизмерительную аппаратуру фирмы Brüel & Kjær. Перечисленные средства измерений обладают высокими параметрами точности, что свидетельствует о достоверности результатов измерений.

В третьей главе изложены основные этапы создания имитационной модели процесса ВСП. Автор определил основные факторы процесса ВСП, которые необходимо было учесть при разработке имитационной модели. Созданная имитационная модель реализована в формате Web-приложения и представляет собой комплекс программного обеспечения, состоящий из расчетных и аналитических программ.

Основу полученного комплекса составляет программа расчета съема припуска с притираемых сферических поверхностей деталей сферического соединения, которая работает по следующему алгоритму: генерация сферических контактных поверхностей; компьютерное смещение поверхностей, силовой расчёт, кинематический расчёт и расчет съёма припуска со сферических поверхностей.

В основу силового расчета автор заложил модель гидравлического взаимодействия жидкостей металлической плотности. Такой подход существенно упрощает алгоритм расчета.

Первичные данные для моделирования, полученные с КИМ, и оценка результатов производятся в других программах из состава комплекса.

В четвертой главе изложены результаты экспериментальных исследований по характеру съема припуска в процессе ВСП при различных стратегиях обработки.

В результате анализа полученных результатов были установлены связи между кинематическими параметрами процесса ВСП и формирующейся геометрии сферического соединения. Полученные данные физического эксперимента стали основой для апробации имитационной модели процесса ВСП. Общая сходимость результатов моделирования с данными физического эксперимента составила порядка 90%. Использование имитационной модели в производственных условиях позволило повысить производительность процесса ВСП до 15%, о чем свидетельствуют данные акта реализации.

В пятой главе изложены результаты экспериментальных исследований параметров виброакустического сигнала, образующегося в сферическом соединении, в процессе ВСП.

В результате анализа полученных результатов были установлены связи между площадью пятна контакта в сферическом соединении и характеристиками образующегося виброакустического сигнала. Для динамической оценки состояния пятна контакта в процессе ВСП автором было предложено использовать диагностический параметр Kf_2 , который выражает отношение амплитуд среднеквадратических значений сигналов АЭ низкочастотного диапазона (0,2...1, кГц) к высокочастотному (24...26 кГц).

Использование диагностического параметра Kf_2 в производственных условиях позволило сократить уровень брака в процессе ВСП на 7–9%, о чем свидетельствуют данные акта реализации.

В заключении подводятся итоги о выполненных исследованиях и созданных разработках, а также формируются общие рекомендации. Основные результаты диссертационного исследования, полученные автором, их последовательность и содержание отражают сущность работы, соответствуют поставленным задачам исследования, а также подтверждают достижение поставленной цели.

Оценка содержания диссертации и автореферата

Анализ содержания и структуры диссертационной работы подтверждает ее завершенность. Представленные материалы диссертации структурированы в логической последовательности, принятая терминология соответствует ГОСТам, а стиль изложения общепринятым академическим нормам. Работа изложена грамотным техническим языком. В каждой главе отражены ключевые результаты научных исследований автора, которые приведены в выводах. Оформление работы соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации и ее основные положения.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки в части пунктов 1, 2, 3. Так в рамках исследования был разработан специализированный сферопритирочный стенд, что соответствует пункту 1 паспорта специальности. Разработано приложение имитационного моделирования съема припуска с контактных сферических поверхностей в процессе ВСП, что соответствует пункту 2 паспорта специальности. Проведены физические экспериментальные исследования по установлению характера съема припуска при различных стратегиях обработки сферических соединений и установлению связей параметров виброакустических сигналов с качеством обработки в процессе ВСП, что соответствует пункту 3 паспорта специальности.

По материалам диссертационного исследования опубликовано 19 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 8 в материалах и сборниках научных трудов конференций, а также получено 6 патентов РФ на изобретения.

Степень достоверности и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается:

- использованием известных научных гипотез, теоретических и практических методов исследования, корректных ограничений и допущений, установленных по результатам анализа информации из достоверных литературных источников;
- удовлетворительным согласованием результатов 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.

Практические результаты получены на сертифицированном и поверенном лабораторном измерительном оборудовании.

Автором получены следующие научные результаты, выносимые на защиту:

1. Конструкция специализированного сферопритирочного станда, 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 результатов исследования

1. Разработана конструкция специализированного станда 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.

Практическая и теоретическая значимость диссертации состоит 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 KF2 как отношение эффективных амплитуд низкочастотного и высокочастотного диапазонов ВА сигнала. Показано, что плавный рост параметра KF2 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.

Рекомендации по использованию результатов и выводов

Результаты, полученные автором, имеют значимость для развития машиностроительных отраслей науки. Научные положения и выводы диссертационной работы рекомендуется использовать на предприятиях судостроительной, автомобилестроительной, авиационной и космической техники. Разработанные решения позволят повысить производительность обработки и качество изделий со сферическими соединениями и получить экономический эффект за счет повышения производительности и снижения брака изделий. Разработанный комплекс теоретических, технических и технологических решений рекомендуется использовать в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям: 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» и 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также аспирантов по научной специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Замечания

Вместе с тем необходимо отметить следующие **замечания по диссертации и автореферату**:

1. В работе проведено комплексное исследование процесса ВСП для изделий со сферическим соединением типа «Шарнир шаровой». Помимо шаровых шарниров к изделиям такого класса относятся шаровые краны, эндопротезы тазобедренных суставов, шаровые опоры, группы линз оптических приборов и др. При проведении дальнейших исследований следует обратить внимание и на другие типы изделий, так как у них встречаются специфические требования к качеству сферических поверхностей не свойственные шаровым шарнирам.

2. У рассматриваемого в исследовании шарового шарнира коническое отверстие в крышке под выход шарового пальца является соосным телу детали. В практике часто встречаются шарниры с наклонным отверстием в силу наличия требований к кинематике механизма. В работе не рассмотрен данный аспект, однако он может существенно повлиять на характер распределения давления в сферическом соединении при реализации процесса ВСП.

3. Традиционно в качестве используемых материалов для изготовления деталей шаровых шарниров используются легированные стали и сплавы, которые дополнительно подвергаются химико-термической обработке. При организации дальнейших исследований было бы неплохо рассмотреть и другие материалы.

4. При организации серии экспериментальных исследований факторы давления и вид абразива в процессе ВСП используются в виде констант. Однако, данные факторы являются одними из ключевых в оказании влияния на динамику съема припуска.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования.

Заключение о соответствии диссертации требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертационное исследование является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой изложены научно обоснованные и оригинальные технические, технологические и конструктивные решения, направленные на совершенствование процесса взаимной сферической притирки. Предложенные разработки способствуют повышению производительности процесса ВСП за счет определения рациональных стратегий обработки посредством имитационного моделирования, а также снижению уровня производственного брака за счет своевременного прекращения обработки посредством мониторинга виброакустических параметров процесса. Эти разработки вносят значительный вклад в дальнейшее развитие отечественного машиностроения.

Достоверность изложенных в диссертации результатов и выводов подтверждается использованием известных научных гипотез, теоретических и практических методов исследования, корректных ограничений и допущений, установленных по результатам анализа информации из достоверных литературных источников, и результатами экспериментальных исследований.

Количество и качество публикаций Клячкова В.А. отвечает п.п. 11, 13 Положения о присуждении ученых степеней. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и соответствует п. 25 Положения о присуждении ученых степеней.

Сформулированная цель достигнута успешным решением поставленных задач исследования, которые соответствуют паспорту научной специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Перечисленное выше дает основание считать, что диссертационная работа Клячкова Владимира Андреевича на тему: «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии» соответствует критериям, установленным п.п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 02.08.2016 г., с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2025). Автор диссертации Клячков Владимир Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Отзыв на кандидатскую диссертацию Клячкова Владимира Андреевича «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической

эмиссии» обсужден и утвержден на заседании кафедры инновационного машиностроения федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» протокол № 12-25/26 от «5» мая 2026 г. На заседании присутствовали 18 научно-педагогических работников. Проголосовали: «за» - 18 чел.; «против» - нет; «воздержались» - нет.

Отзыв на обсуждение представил профессор кафедры инновационного машиностроения, доктор технических наук, профессор


7.05.2026

Волков Дмитрий Иванович

Специальность: 05.03.01 Процессы механической и физико-технической обработки, станки и инструмент

E-mail: d_i_volkov@rsatu.ru. Тел.: 8(4885) 222-556

152934, г. Рыбинск, ул. Плеханова, д. 2, Первый корпус, каб. 226

ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»

Заведующий кафедрой
инновационного машиностроения
к.т.н.



Тарасов Сергей Сергеевич

Подписи Волкова Д.И. и Тарасова С.С. подтверждаю ВРИО Ученого секретаря Ученого совета ФГБОУ ВО «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева»



Н. В. Архарова

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» РГАТУ имени П.А. Соловьева

Адрес: 152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина, д. 53.

Телефон: +7(4855) 23-97-22

E-mail: rector@rsatu.ru