

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук Кулькова Анатолия Александровича на диссертацию Клачкова Владимира Андреевича на тему: «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

1. Актуальность темы диссертации

Сферическое соединение деталей часто встречается в изделиях, относящихся к различным отраслям промышленности. К таким изделиям предъявляют высокие технические требования по точности геометрической формы и шероховатости сферических поверхностей, которые необходимы для обеспечения максимального пятна контакта сопрягаемых деталей. В большинстве случаев для соблюдения этих требований в качестве окончательной обработки изделия используют метод взаимной сферической притирки (ВСП) деталей соединения, которая выполняется вручную либо механизированным способом. Так как на качество обработки в процессе притирки влияет большое количество факторов, то формирование методов прогнозирования результатов обработки и своевременного прекращения технологической операции является актуальной научной задачей.

2. Оценка содержания диссертации и автореферата, степени завершенности

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. Выдвигаемые в диссертации положения обоснованы и доказаны.

Во введении автором обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, представлены 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 установлены ключевые особенности процесса притирки и факторы влияющие на качество обработки. Также рассмотрены основные методы повышения эффективности процесса притирки, такие как: метод разделения технологических операций, экспериментально-поисковый метод, метод математического моделирования процесса, метод мониторинга процесса обработки и комбинированный. Наибольшую популярность в современном производстве приобрели методы математического моделирования притирки и мониторинга процесса обработки. На основе анализа имеющихся в открытой печати сведений, автором был сформирован новый метод повышения эффективности притирки, заключающийся в синтезе имитационного моделирования и динамического мониторинга акустической эмиссии (АЭ).

Вторая глава посвящена формированию материально-технической базы для проведения экспериментальных исследований процесса ВСП. Для проведения физического эксперимента автором было принято решение о разработке специализированного сферопритирочного стенда.

Разработка стенда производилась поэтапно и включала в себя следующие стадии: анализ существующего притирочного оборудования, декомпозиция состава стенда, разработка кинематической схемы, 3D-моделирование стенда, разработка программного комплекса управления стендом, сборка и наладка стенда.

В результате последовательного выполнения этапов разработки, автором было создано специализированное сферопритирочное оборудование, конструкция которого в последствии была запатентована.

Также в главе представлен порядок определения перечня необходимой измерительной аппаратуры и средств измерения. Для выполнения высокоточных измерений геометрической формы контактных сферических поверхностей деталей шарнира использовалась координатно-измерительная машина Carl Zeiss. Для записи виброакустического (ВА) сигнала использовалась измерительная аппаратура Brüel&Kjær. Представленные средства измерения обладают высокими точностными характеристиками и гарантируют достоверность полученных данных.

Третья глава посвящена созданию имитационной модели процесса ВСП. По результатам предварительного анализа было принято решение о разработке собственного приложения на открытых языках программирования, так как в имеющихся программных продуктах существует

ряд ограничений по чтению данных измерений, а также зависимость от прикладных библиотек.

После проведенного анализа, выполнялась разработка 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 со сферических поверхностей деталей шарнира по модифицированному уравнению Престона.

Разработанная имитационная модель в части силового расчета базируется на физике гидравлического взаимодействия. Детали шарнира рассматриваются, как сплошные среды металлической плотности.

Для обеспечения работоспособности программы были созданы дополнительные приложения, которые в своей совокупности образуют аппаратно-программный комплекс информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования ВСП. В состав комплекса входит 5 программ.

В четвертной главе изложено планирование и проведение эксперимента по исследованию съема припуска в процессе ВСП. По результатам проведенных опытов было установлено, что в процессе притирки происходит постепенное уменьшение среднего радиуса сферического соединения и увеличение отклонения от сферичности.

Также было установлено, что для рассматриваемого в исследовании шарового шарнира лучшее качество обеспечивает стратегия, в которой значения скоростей сферического движения прецессии, нутации и собственного вращения находятся во взаимном отношении, равном $4/1/-2$ соответственно.

Далее была проведена апробация имитационной модели, которая позволила установить посредством компьютерного моделирования характер изменения пятна контакта в шаровом шарнире при реализации процесса ВСП.

Общая средняя сходимость результатов имитационного моделирования с данными экспериментальных исследований составила более 90%.

Установлено, что имитационное моделирование позволяет определить момент времени, когда при заданной стратегии обработки достигается наилучшее качество поверхности шарового шарнира. Апробация модели в производственных условиях позволила повысить производительность ВСП на 8-15%, о чем свидетельствует соответствующий акт реализации. Также, имитационная модель позволяет ускорить поиск рациональных режимов обработки при запуске производства новых шаровых шарниров.

В пятой главе автор изложил основные результаты проведенного исследования параметров ВА сигнала в сферическом соединении в процессе ВСП.

В результате анализа была выявлена устойчивая связь между площадью пятна контакта в сферическом соединении и ВА сигналом. Также было установлено, что резкий скачок с повышением уровней пиковой огибающей среднеквадратических значений при сохранении образовавшихся уровней во времени свидетельствует об образовании явления шаржирования абразивного зерна в контактную сферическую поверхность детали шарнира.

Автором был предложен параметр K_{F2} , который выступает в качестве диагностического показателя отношения амплитуд сигналов АЭ в диапазонах низких (0,2...1,2 кГц) и высоких частот (24...26 кГц). Установлено, что увеличение площади пятна контакта ведет к увеличению значения параметра K_{F2} из-за распределения внешней нагрузки по большей площади. 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.

В заключении подведены основные итоги теоретических и практических исследований в виде результатов и общих выводов, которые были получены при проведении диссертационного исследования.

Автореферат и 19 опубликованных работ, 5 из которых изданы в журналах, рекомендованных перечнем ВАК, отражают основное содержание исследования и дают достаточно полное представление о содержании диссертации.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

К наиболее важным научным результатам, полученным автором в ходе исследования и обладающим **научной новизной**, относятся следующие:

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 контактными сферическими поверхностями 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.

Положения по практической ценности диссертации заключаются в следующем:

1. Предложена новая кинематика и соответствующая конструкция сферопритирочного станда, 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 контактными поверхностями 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.

Кроме того, **степень достоверности выводов, результатов и рекомендаций** подтверждается ориентированием на основные принципы системного подхода, согласованностью с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов и практической верификацией основных положений диссертации. Результаты имитационного моделирования имеют высокую сходимость с данным физического эксперимента. Измерительное оборудование, использовавшееся в экспериментах, проходит регулярную поверку. Проверка основных результатов диссертации в производственных условиях дала положительный эффект при изготовлении опытной партии шаровых шарниров.

4. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки в части следующих пунктов:

1. Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т.д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий.

2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий.

3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.

5. Замечания по диссертации

1. Для повышения расчетной точности имитационного моделирования было бы целесообразно в качестве алгоритма распределения давления в сферическом соединении использовать метод МКЭ.

2. В конструкции высоконагруженных шаровых шарниров на практике часто используются легированные стали. Следовало бы при дальнейших исследованиях проводить испытания на образцах, изготовленных не только из стали 20, но и из более характерных материалов для сферического соединения.

3. При выполнении работы не проводились исследования съема припуска при использовании других видов абразивных материалов.

Указанные замечания имеют локальный характер и не меняют общей положительной оценки диссертации Клачкова В.А.

6. Заключение

Диссертация «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии» является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические, технологические и конструктивные решения, направленные на совершенствование процесса взаимной сферической притирки деталей шаровых шарниров, имеющие существенное значение для развития страны,

Официальный оппонент,
Кульков Анатолий Александрович,
доктор технических наук (2.5.5. Технология
и оборудование механической и физико-технической обработки),
профессор кафедры «Технология транспортного машиностроения
и ремонта подвижного состава» федерального государственного
автономного образовательного учреждения высшего образования
«Российский университет транспорта».

Почта: pow12@mail.ru

А. А. Кульков

25.05.2026 г.

Я Кульков Анатолий Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных, содержащихся в настоящем отзыве, в документы, связанные с защитой диссертации Клачкова Владимира Андреевича, и их дальнейшую обработку.



А. А. Кульков

25.05.2026 г.

ПРИДВИСЬ
ЗАВЕРЯЮ
ДИРЕКТО

23.03.2026 г.
Кузнецова А.А.

С. Н. КОЗЛОВ

