

ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н., Алленова Дмитрия Геннадьевича на диссертационную работу Клачкова Владимира Андреевича: «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

1. Актуальность темы исследования.

Шаровые шарниры широко применяются в различных отраслях промышленности (автомобилестроении, станкостроении, судостроении, авиастроении, приборостроении, медицинской промышленности и др.) благодаря компактности, высокой несущей способности и предотвращению заклинивания механизмов. Их ключевая особенность — жёсткие требования к точности геометрической формы и шероховатости поверхностей для обеспечения максимального пятна контакта. Такие требования особенно критичны для высоконагруженных шарниров и опор. В качестве окончательной обработки чаще используют взаимную сферическую притирку (ВСП). Разработка методов прогнозирования результатов притирки и своевременного прекращения обработки является **актуальной научной задачей**, решение которой повысит производительность и качество производства.

2. Новые научные результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, их обоснованность и достоверность.

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.

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.

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.

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.

Степень достоверности результатов подтверждается применением методологии системного подхода, а также успешной практической верификацией ключевых положений диссертации. Результаты имитационного моделирования демонстрируют высокую степень сходимости с данными, полученными в ходе физического эксперимента. Применение поверенного измерительного оборудования гарантирует точность экспериментальных данных. Производственные испытания подтвердили практическую значимость результатов.

3. Положения практической ценности работы и использование научных результатов.

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.

4. Содержание и оформление диссертации и автореферата.

Объем исследования составляет 207 страниц. Структура работы включает введение, пять содержательных глав, заключение, список сокращений и шесть приложений; список использованных источников насчитывает 119 наименований. Иллюстративный материал представлен 137 рисунками и 26 таблицами, аналитическая часть — 30 формулами. Все научные положения, сформулированные в работе, получили надлежащее обоснование и подтверждение.

Во введении раскрыта актуальность исследования, проанализирована степень научной разработанности проблемы, определены объект, предмет и цель работы. Также сформулированы задачи, основные защищаемые положения,

научная новизна и значимость (теоретическая и практическая), приведены сведения о публикациях и апробации результатов.

В первой главе представлен анализ научно-технической литературы, который позволил установить особенности процесса притирки и определить факторы влияющие на качество обработки.

Также в главе рассмотрены методы повышения эффективности. Установлено, что в производственной практике наибольшее распространение получили методы математического моделирования притирки и мониторинга процесса обработки. На основе анализа опубликованных методов автором был разработан новый подход к повышению эффективности притирки, который заключается в совместном использовании имитационного моделирования и динамического мониторинга акустической эмиссии (АЭ).

Вторая глава посвящена созданию материально-технической базы для экспериментальных исследований процесса ВСП. Автор разработал специализированный сферопритирочный стенд, создав его в несколько этапов: от анализа существующего оборудования и 3D-моделирования до сборки, наладки и разработки управляющего программного комплекса. Итоговая конструкция была запатентована.

Также в главе приведён порядок подбора стандартного измерительного оборудования. Для измерений геометрической формы сферических контактных поверхностей использовался прибор Carl Zeiss, а для записи ВА-сигнала — аппаратура Brüel & Kjær. Высокая точность этих средств гарантирует достоверность результатов.

Третья глава посвящена созданию имитационной модели процесса ВСП, которая представляет собой программное приложение собственной разработки.

Основу приложения составляет алгоритм расчёта съёма припуска с обрабатываемых поверхностей деталей шарового шарнира в процессе ВСП, который состоит из следующих основных этапов: 3D-генерация сферических контактных поверхностей деталей шарнира; компьютерное смещение поверхностей крышки и подпятника до контакта с поверхностью шарового пальца, силовой расчёт, кинематический расчёт и расчет съёма припуска со сферических поверхностей деталей шарнира.

Автором была предложена новая модель распределения давления в сферическом соединении, базирующаяся на физике гидравлического взаимодействия, при котором детали шарнира рассматриваются как сплошные среды металлической плотности.

Также для обеспечения полноценной работоспособности приложения был создан аппаратно-программный комплекс, который включает в себя 5 вспомогательных программ.

Четвёртая глава посвящена планированию и проведению экспериментального исследования съёма припуска в процессе ВСП.

В ходе экспериментальных опытов выявлены следующие закономерности: постепенное уменьшение среднего радиуса сферического соединения; увеличение отклонения от сферичности. Установлено, что для исследуемого шарового шарнира наилучшие параметры качества достигаются при соблюдении определённого соотношения скоростей сферического движения: прецессии; нутации; собственного вращения. Оптимальное соотношение составляет 4:1:(-2) соответственно.

Апробация разработанной имитационной модели продемонстрировала сходимость результатов моделирования с данными экспериментальных исследований в пределах 90% и позволила повысить производительность процесса ВСП в производственных условиях до 15%.

В пятой главе представлены результаты исследования параметров ВА сигнала в сферическом соединении в процессе ВСП.

Проведённый анализ позволил установить связь между площадью пятна контакта в сферическом соединении и характеристиками ВА-сигнала, а также выявить, что резкий скачок с повышением уровней пиковой огибающей среднеквадратических значений служит индикатором явления шаржирования абразивного зерна в обрабатываемую поверхность.

Автором предложен диагностический параметр Kf_2 , представляющий собой отношение амплитуд сигналов акустической эмиссии (АЭ) в двух частотных диапазонах: низких частот: 0,2...1,2 кГц и высоких частот: 24...26 кГц.

Экспериментально подтверждено, что увеличение площади пятна контакта приводит к росту значения параметра Kf_2 за счёт распределения внешней нагрузки

на большую площадь поверхности. Использование данного параметра позволяет повысить управляемость процессом ВСП и сократить уровень брака в процессе обработки на 7–9%.

В заключении систематизированы основные итоги теоретических и практических исследований, сформулированы обобщающие выводы.

Основное содержание проведённого исследования отражено в автореферате и 19 опубликованных работах, 5 из которых размещены в журналах ВАК.

5. 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, 3 паспорта научной специальности.

6. Замечания по работе.

1. В разработанное оборудование стоит добавить систему дозированной подачи абразивной смеси, чтобы исключить человеческий фактор при замене суспензии.

2. Стоило бы в алгоритме имитационного моделирования также попробовать использовать модель нелинейного упругого основания в части расчета распределения давления. Впоследствии можно было бы выбрать модель на основе сравнительного анализа по полученным результатам.

3. В работе не приведено основание выбора материала. В качестве типовых материалов для силовых шаровых шарниров традиционно используются легированные стали. В связи с этим стоит обратить внимание и на другие материалы при дальнейших исследованиях.

4. В диссертации имеются опечатки и пунктуационные ошибки.

5. В экспериментальной части работы (глава 4) использовано всего 5 образцов шаровых шарниров, каждый из которых обрабатывался по одной из пяти различных стратегий (опыты №1–5). При этом ни одна стратегия не была повторена на нескольких образцах, отсутствуют параллельные опыты в одинаковых условиях. Все выводы о характере съёма припуска, изменении пятна контакта и эффективности стратегий сделаны по результатам единичных наблюдений.

6. В диссертации параметр «относительная площадь пятна контакта» рассчитывается геометрически, без учёта шероховатости поверхностей и фактической деформации неровностей, что не соответствует физическому понятию площади касания. Автору рекомендуется использовать термин «относительная номинальная (геометрическая) площадь контакта», «номинальная площадь контакта» либо явно оговаривать принятое допущение, чтобы избежать терминологической неточности.

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации Клячкова В.А.

7. Заключение.

Диссертационная работа представляет собой завершённое научно-квалификационное исследование, в рамках которого разработаны научно обоснованные и оригинальные технические, технологические и конструктивные решения для совершенствования процесса взаимной сферической притирки (ВСП) деталей шаровых шарниров. Реализованные разработки позволяют: повысить производительность обработки деталей; снизить уровень брака на производстве шаровых шарниров. Таким образом, полученные результаты вносят существенный вклад в развитие отечественного машиностроения, способствуя повышению конкурентоспособности технологических процессов.

Работа «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга акустической эмиссии» отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней (постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.2013, ред. 28.08.2017). Автор диссертации, Клячков Владимир Андреевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 — «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Официальный оппонент, кандидат технических наук,
доцент кафедры машиностроительных технологий
инженерной академии РУДН

20 мая 2026 г.

Алленов Дмитрий Геннадьевич

Контактные данные:

тел.: +7(925) 313-88-35, e-mail: allenov-dg@rudn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
05.02.07 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Адрес места работы: 117198 г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», инженерная академия, кафедра «Машиностроительные технологии»

Подпись к.т.н., Алленова Дмитрия Геннадьевича удостоверяю.

Ученый секретарь ученого совета инженерной академии РУДН,

кандидат технических наук, с.н.с.

О.Е. Самусенко

