

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

На правах рукописи



Клочкин 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»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Козочкин М.П.

Москва 2026г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ПРИТИРКИ И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ.....	14
1.1 Анализ процесса притирки	14
1.1.1 Физическая сущность притирки	14
1.1.2 Классификация факторов процесса притирки.....	15
1.1.3 Модель взаимодействия абразивного зерна с поверхностью детали.....	16
1.1.4 Поверхностный слой детали после притирки	17
1.1.5 Особенности процесса взаимной сферической притирки.....	18
1.2 Методы повышения эффективности притирки.....	20
1.2.1 Классификация методов повышения эффективности притирки.....	20
1.2.2 Сравнительный анализ математических моделей процесса притирки.....	21
1.2.3 Анализ методов мониторинга и диагностики вибраций абразивной обработки	32
1.2.4 Формирование нового метода повышения эффективности притирки.....	34
1.3 Выбор и описание изделия для взаимной сферической притирки	35
1.4 Выводы по первой главе	37
2 ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	38
2.1 Разработка притирочного стенда	38
2.1.1 Декомпозиция оборудования	39
2.1.2 Разработка кинематической схемы	39
2.1.3 3D-моделирование притирочного оборудования и разработка конструкторской документации.....	41
2.1.4 Разработка управляющей программы для притирочного оборудования	46
2.1.5 Сборка и наладка притирочного оборудования	47
2.2 Стандартные лабораторные средства измерения	51
2.2.1 Координатно-измерительная машина	51
2.2.2 Виброакустическое оборудование	53
2.2.3 Прочие средства измерения	54
2.3 Выводы по второй главе.....	57
3 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ	58
3.1 Выбор инструментария имитационного моделирования.....	58

3.2	Формирование концепции имитационного моделирования.....	59
3.2.1	Определение основных факторов процесса притирки	59
3.2.2	Кинематика процесса взаимной сферической притирки	63
3.2.2.1	Особенности сферического движения	63
3.2.2.2	Анализ кинематики разработанного стенда	67
3.2.3	Распределения давления в зоне притирки	69
3.2.3.1	Выбор модели распределения давления в сферическом соединении	69
3.2.3.2	Влияние отклонения формы поверхности в зоне контакта на распределение давления	73
3.2.4	Физическая сущность процесса взаимной сферической притирки.....	75
3.3	Алгоритм имитационного моделирования процесса взаимной сферической притирки.....	76
3.3.1	Генерация сферических поверхностей.....	76
3.3.2	Смещение сферических поверхностей.....	79
3.3.3	Расчет распределения давления на сферических поверхностях.....	80
3.3.4	Расчет пройденных путей сегментами сферических поверхностей	85
3.3.5	Расчет радиального съема припуска сферических поверхностей	86
3.4	Характеристика разработанного приложения	87
3.5	Выводы по третьей главе	91
4	ИССЛЕДОВАНИЕ СЪЕМА ПРИПУСКА С КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СФЕРИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ.....	92
4.1	Планирование эксперимента	92
4.1.1	Установление цели эксперимента	92
4.1.2	Условия проведения эксперимента	93
4.1.3	Выбор значений факторов эксперимента	94
4.1.4	Составление плана эксперимента.....	95
4.1.5	Методики выполнения измерений	97
4.1.6	Методики обработки экспериментальных данных	99
4.2	Обсуждение полученных результатов.....	101
4.3	Апробация имитационной модели притирки.....	107
4.4	Формирование рекомендаций по поиску рациональных стратегий обработки сферических поверхностей в процессе взаимной сферической притирки	111
4.5	Выводы по четвертой главе	112

5	ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В СФЕРИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ.....	114
5.1	Планирование эксперимента	114
5.1.1	Установление цели эксперимента	115
5.1.2	Условия проведения эксперимента	115
5.1.3	Составление плана эксперимента.....	117
5.1.4	Методика выполнения измерений.....	119
5.1.5	Методики обработки экспериментальных данных	122
5.2	Исследование виброакустических сигналов при различных условиях трения в сферическом соединении.....	123
5.3	Исследование виброакустических сигналов процесса притирки	126
5.4	Формирование практических рекомендаций по мониторингу виброакустического сигнала в процессе взаимной сферической притирки и подбору диагностических параметров.....	134
5.5	Выводы по пятой главе	135
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	137
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	140
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	141
	ПРИЛОЖЕНИЕ А Структура аппаратно-программного комплекса информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования взаимной сферической притирки.....	153
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б Данные моделирования пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарового шарнира	158
	ПРИЛОЖЕНИЕ В Экспериментальные данные по исследованию характера съема припуска с поверхностей при различных стратегиях обработки	163
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г Экспериментальные данные по исследованию виброакустических сигналов при различных условиях трения в сферическом соединении.....	191
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты использования результатов научной работы и апробация имитационной модели.....	199
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е Патенты на изобретения и свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ РФ по теме диссертации.....	204

ВВЕДЕНИЕ

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 [1-3]. За счет высоких требований удается достичь 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 [2]. 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 [3]. Отдельно следует отметить сферическое соединение группы линз оптических приборов. От точности сопряжения линз и отклонения от сферичности поверхностей зависит степень искажения [4].

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 [2]. Электроэрозионная обработка экономически оправдана для индивидуальной обработки деталей [5], так как при изготовлении изделий со сферическим соединением потребуются 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.

Основными недостатками ВСП являются сложность подбора рациональных кинематических параметров обработки и трудность определения момента своевременного прекращения обработки. Обуславливаются данные недостатки наличием большого количества факторов, влияющих на притирку.

В силу представленных сложностей сформировалась проблемная ситуация, где наиболее точные изделия со сферическим соединением притираются вручную высококвалифицированными слесарями. Это приводит к росту трудоемкости операции по сравнению с машинной притиркой и к зависимости предприятий от производственных кадров высокой квалификации.

Так же сложность представляет необходимость регулярного контроля качества изделия, для чего приходится периодически разбирать соединение, осуществлять очистку зоны притирки и производить измерения. В случае недостижения требуемых значений параметров качества изделие повторно притирается.

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 темы исследования. В современном производстве делаются попытки ухода от высокоточной ручной притирки к механизированной. В литературе предлагаются различные методы повышения эффективности механизированной притирки, улучшающие управляемость процесса обработки, которые можно классифицировать на следующие группы: методы разделения технологических операций, методы математического моделирования процесса обработки, экспериментально-поисковые методы, методы мониторинга процесса обработки и др.

Наибольшую популярность в последнее время приобрели методы математического моделирования и мониторинга процесса обработки, так как при их внедрении можно использовать накопленный производственный опыт.

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.

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 перспективе развитие данного метода позволит автоматизировать процесс ВСП с динамической корректировкой стратегии обработки изделий со сферическим соединением, на основе данных полученных с мониторинга параметров АЭ. Также

данный метод позволит определять момент своевременного прекращения притирки, когда параметры качества изделия достигли необходимых значений.

В основу предлагаемого подхода заложена гипотеза о том, что в процессе притирки происходит изменение пятна контакта в сферическом соединении, и, 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, которые необходимо решить для достижения поставленной цели 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 следующие защищаемые положения, обладающие научной новизной:

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 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.

Теоретическая значимость определяется тем, что:

- разработана кинематика сферопритирочного станда, 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 станда по функциональному признаку. Практические результаты исследования были получены с использованием методов экспериментального исследования, измерения геометрических характеристик сферических поверхностей, стандартизованной 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.

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.

География апробации и обсуждения работы позволяет сделать вывод о широкой информированности научной общественности о результатах диссертационных исследований.

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

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

– 5 статей [100-103, 112] в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикаций диссертационных исследований по защищаемой специальности и отрасли наук журнал «Контроль. Диагностика» [112] (категория К1), журнал «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение» [100, 101, 103] (категория К2), журнал «Вестник МГТУ «Станкин» [102] (категория К2));

– 6 патентов на изобретение [69-74], 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 [75, 113-119].

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.

1 ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ ПРИТИРКИ И СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ

1.1 Анализ процесса притирки

1.1.1 Физическая сущность притирки

Притирку можно охарактеризовать как процесс сложного изнашивания поверхности под воздействием большого числа абразивных зерен и поверхностно-активных веществ.

Поскольку на процесс притирки влияет множество факторов и взаимодействия с абразивом происходят на микро- и наноуровне, то можно утверждать, что притирка основывается на механических, физико-химических и химических процессах [1-3].

Механический процесс представляет собой скалывание части материала, образование стружки, наклеп и последующее выкрашивание, истирание поверхностного слоя, пластическое и упругое деформирование поверхностного слоя [4]. Преобладание какого-либо из процессов зависит от факторов притирки. Хрупкое разрушение свидетельствует о том, что скорость деформации превышает максимально допустимую для пластического деформирования. Съём припуска с поверхности хрупких тел в основном представляет собой выкрашивание [5-7]. Съём припуска с поверхности пластичных тел происходит из-за пластического деформирования с образованием стружки и наклепа [8]. Наклеп, в свою очередь, доходит до предельно хрупкого состояния, после которого поверхность изнашивается аналогично поверхности хрупкого тела [9-10].

Физико-химический процесс заключается в образовании оксидных пленок на поверхности детали и, затем, в их удалении абразивным материалом [11]. При этом оксидная пленка образуется под действием поверхностно-активных веществ, находящихся в составе абразивных смесей. Далее пленка адсорбирует смазывающие вещества кислыми частями к поверхности и жирными наружу. Абразив способен адсорбировать жирные части смазывающих веществ. Тем самым происходит схватывание системы абразив – смазывающее вещество – оксидная пленка и последующее выкрашивание поверхности при движении абразива. Образованная новая поверхность далее окисляется под воздействием внешних факторов и процесс повторяется.

Химический процесс заключается в образовании химических соединений с постепенным формированием хрупкого или пластичного слоя на поверхности заготовки.

Основным процессом съема припуска с поверхности при притирке является механический. В образованной стружке содержание не окисленного металла составляет более 97,5% [2]. Таким образом, доминирующими факторами притирки являются физико-механические характеристики процесса. Однако следует отметить, что химические процессы могут способствовать ускоренному механическому разрушению. Так, например, при упругопластическом деформировании материала возникает большая и неравновесная концентрация вакансий и дислокаций атомов, что приводит к ускорению диффузионных процессов. В дальнейшем снижается контактная прочность отдельных зон и происходит ускоренный съем припуска.

Процесс съема припуска также происходит и на участках прямого контакта притира с деталью, при этом наблюдается следующая тенденция: при малых скоростях и значительных деформациях может происходить локальное схватывание поверхности и последующий холодный задир [12-14]. При повышении скорости этот процесс значительно снижается и происходят лишь диффузионные явления активных поверхностных слоев со средой зоны контакта. При дальнейшем повышении скорости вырастает температура в зоне трения и увеличивается интенсивность диффузионных процессов, что приводит к горячему задир.

Интенсивность съема припуска при притирке в большей степени зависит прямо пропорционально от величины давления при прочих равных условиях [3]. При этом повышение интенсивности съема припуска на локальном участке приводит к снижению давления на нем. Таким образом, процесс съема припуска может носить колебательный характер. При подобной переменной скорости притирки интенсивность съема припуска повышается. Это связано с накоплением напряжений в поверхностном слое и дальнейшим усталостным разрушением.

1.1.2 Классификация факторов процесса притирки

Основными показателями притирки являются производительность процесса и качество поверхности детали. В научно-технической литературе [2, 3, 9-11] принято выделять следующие группы факторов, влияющих на производительность процесса притирки и качество получаемой поверхности: кинематическую, динамическую, технологическую, геометрическую.

Технологическая качественная группа факторов включает в себя вид абразива и суспензии, материал притира и заготовки, состояние их поверхностных слоев, режим подачи абразивной смеси. Технологическая количественная группа

факторов – это среднеожидаемый размер зерна абразивной смеси, концентрация абразива в смеси по массе, рабочее давление, твердость материалов притира, заготовки и абразива.

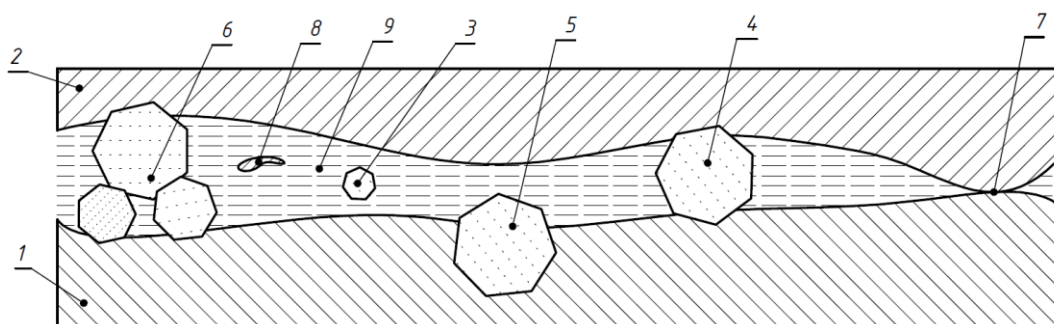
К кинематической группе факторов относится траектория движений притирки, перекрытие зон притирки, путь притирки, скорость и ускорение в процессе притирки.

К динамической группе факторов относится: среднее значение, закон изменения и распределения давления (силы) в зоне притирки; инерция заготовок, притира и абразивной смеси в процессе притирки.

К геометрической группе – геометрия обрабатываемой поверхности и ее точность, геометрия и размеры канавок для подачи смеси.

1.1.3 Модель взаимодействия абразивного зерна с поверхностью детали

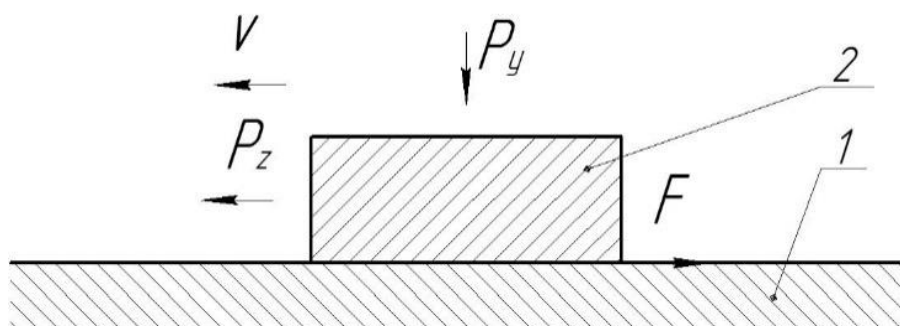
В процессе притирки абразивное зерно может находиться в 3-х состояниях: свободном, полужакопленном и заакопленном [5, 8, 9] (рисунок 1.1). При свободном состоянии отсутствует силовое замыкание, размер зерна меньше образованного локального зазора между деталью и притиром. В процессе притирки участвуют зерна, находящиеся в зацеплении между деталью и притиром. Состояние зацепления можно классифицировать по количеству зерен в зацеплении: одно или несколько. Одно зацепление характеризуется размером зерна между вершинами контакта больше зазора. Несколько зацеплений характеризуется тем, что несколько зерен заакопляют друг друга, а суммарный размер между вершинами контакта больше зазора. Также можно классифицировать вид движения зерна: поступательное, вращательное и комбинируемое. Поступательное возникает при шаржировании зерна в поверхность притира или детали. Вращательное – при переааывании зерна по поверхности детали и притира. Комбинируемое – при чередующемся заедании и переааывании зерна.



1 – притир; 2 – деталь; 3 – свободное зерно; 4 – полужакопленное зерно, однозерновой контакт; 5 – заакопленное зерно; 6 – многозерновой контакт; 7 – прямой контакт притира и детали; 8 – стружка; 9 – суспензия

Рисунок 1.1 – Модель взаимодействия абразива с поверхностью детали и притира

Силу, с которой притир давит на тело, принято обозначать P_y . Силу, необходимую для движения притира относительно заготовки – P_z . Отношение P_y к P_z является наиболее стабильным показателем микрорезания, оно всегда больше 1. Силу давления принято выбирать из условия оптимальной производительности и сохранять постоянной в процессе резания. Таким образом, при росте отношения P_y к P_z можно сделать заключение о необходимости обновления притирочной смеси (рисунок 1.2). Стабилизация значения силы P_z свидетельствует об установившемся характере процесса притирки.



1 – притир; 2 – деталь

Рисунок 1.2 – Силы возникающие в процессе притирки

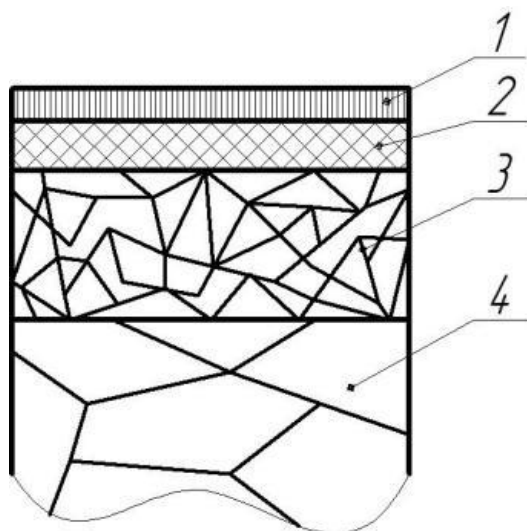
В общем случае сила P_z может быть представлена как совокупность следующих сил: сила трения, сила резания, сила разрушения зерна.

1.1.4 Поверхностный слой детали после притирки

Принято выделять 2 зоны полученного поверхностного слоя [10]. Первая расположена непосредственно под изношенной поверхностью. Она характеризуется высокой плотностью дислокаций. Вторая зона располагается под первой, она является переходной и характеризуется меньшими деформациями. Толщина первой зоны при обработке сталей сначала плавно увеличивается, затем снижается. Со второй зоной происходит аналогичная ситуация.

С.Г. Бабаев рассматривает поверхностный слой, состоящий из 4 зон [9] (рисунок 1.3). Первый слой – наружный. Он находится на наружной поверхности детали и имеет толщину от 0,0002 мкм до 0,0003 мкм. Первый слой содержит адсорбционные молекулы газа. Следующий второй слой – приграничный. Он состоит из адсорбционной молекулярной пленки с мельчайшими вкрапленными абразивными частицами. Толщина слоя составляет от 0,002 мкм до 0,008 мкм. Слой образуется под воздействием кислорода, жирных кислот и азота, содержащихся в суспензии. Третий слой – переходный. Он представлен в виде напряженно-деформированного слоя. Толщина составляет порядка

5 мкм. Последний четвертый слой – основной. Он представлен недеформированным металлом.



1 – наружный слой; 2 – приграничный слой; 3 – переходный слой; 4 – основной слой

Рисунок 1.3 – Структура поверхностного слоя

Также на поверхности детали образуются вторичные структуры двух видов. Структура первого вида представлена тончайшим пластически деформированным слоем в виде подвижных пленок. Особенность этих пленок состоит в отсутствии четких границ с основным металлом. При этом эти пленки заполняют впадины на поверхности, снижая шероховатость и отклонения формы. Вторичная структура второго вида представлена в виде пленок с повышенной твердостью и хрупкостью. Их механические свойства обусловлены химическими реакциями с образованием оксидов, нитридов и т.п. Особенность этих пленок состоит в наличии четких границ с основным металлом. В ходе обработки они активно покрываются трещинами и в дальнейшем выкрашиваются. При этом образуется бугристая поверхность. Процесс образования вторичных структур носит циклический характер при обработке.

1.1.5 Особенности процесса взаимной сферической притирки

По результатам проведенного анализа научно-технической литературы [3, 15-19] было установлено, что для процесса притирки принято выделять пять основных особенностей.

Первая особенность: инструмент комплексный и состоит из притира, абразивных зерен, рабочей жидкости. Однако есть исключение: при взаимной притирке притир отсутствует.

Вторая особенность: при притирке вектор скорости обычно не постоянен в процессе. В первую очередь это связано с особенностью кинематики притирочного оборудования. Однако есть и исключение – ленточно-притирочный станок.

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 [3] были установлены следующие особенности свойственные ВСП:

1. Максимально допустимый размер основных фракций абразива не должен превышать допуска на зазор в притираемой паре. Это обусловлено принципиальной возможностью обеспечения точности соединения. Следует отметить, что отдельные зерна, формирующие неосновные фракции, могут превышать по размеру допустимый зазор в соединении, так как они принадлежат к фракции с большей зернистостью. Связано это с особенностями технологического процесса изготовления абразивных зерен, которые просеивают через специальные сита. Количество таких зерен в общей взвеси не превышает 10–15%. Существенного влияния эти зерна не окажут на параметр точности соединения, так как в процессе обработки зерна углубляются в обрабатываемую поверхность, а также периодически разрушаются.

2. Рациональные значения скорости и давления для взаимной притирки меньше, чем для индивидуальной притирки. Это связано с меньшим теплоотводом из зоны притирки. Как следствие, повышение температуры приводит к снижению стойкости абразива и риску образования задира.

3. Подбор режимов обработки с минимизацией эффекта шаржирования абразивными зёрнами. При взаимной притирке отсутствует притир, поэтому не допускается наличие шаржирующих зерен в поверхности детали. Наличие абразива в соединении может привести к ускоренному выходу из строя изделия.

4. Невозможность обеспечения одинаковой линейной скорости притирки на всех участках притираемой поверхности из-за отсутствия поступательных движений. При сферической притирке возможны только вращательные и возвратно-качательные движения. При этом возникает динамическая ось вращения. Вдоль оси скорости притирки

равны нулю, а максимальная скорость находится в кольцевой зоне экваториального сечения относительно динамической оси вращения.

5. Давление распределяется по поверхности не равномерно, что связано с формой контактирующих поверхностей деталей. В процессе притирки давление постепенно перераспределяется на участки пониженного съема припуска.

Первые три особенности в целом свойственны всем процессам взаимной притирки, а последние два – для ВСП.

1.2 Методы повышения эффективности притирки

1.2.1 Классификация методов повышения эффективности притирки

В области машиной притирки активно применяются следующие методы повышения управляемости качеством обрабатываемых изделий: метод разделения технологических операций, экспериментально-поисковый метод, метод математического моделирования процесса, метод мониторинга процесса обработки, комбинированный.

Метод разделения технологических операций заключается в постепенном уменьшении зернистости абразивной суспензии на разных стадиях притирки. Такой метод применим для создания герметичных соединений. Однако, не всегда применим в условиях подвижных соединений, при которых максимально допустимый размер основных фракций абразива не должен превышать минимально необходимый зазор в сферическом соединении. Требование по минимальному зазору часто встречается в высокоточных шаровых шарнирах. Этот зазор необходим для формирования масляной пленки между трущимися поверхностями. Сплошность пленки обеспечивается точностью геометрической формы сферических поверхностей и силами поверхностного натяжения масла. Поэтому данный метод имеет ограниченную применимость для задачи взаимной притирки.

Экспериментально-поисковый метод заключается в постепенном подборе значений параметров процесса притирки, обеспечивающих удовлетворительное качество изделия. Данный метод применяется в условиях массового производства для поиска оптимума оцениваемого параметра и требует значительных временных затрат.

Использование метода математического моделирования оправдано в условиях ограниченного количества типоразмерной номенклатуры изделий. Метод может быть представлен следующими вариантами: математическое моделирование съема припуска с поверхности по регрессионным аналитическим моделям и численное САЕ-моделирование

динамики съема припуска. С ростом производительности вычислительных систем широкое распространение получил второй вариант – разработка CAE-моделей.

Для наладки представленных выше методов требуется проведение высокоточных измерений геометрической формы сферических поверхностей. Такие измерения выполняются на дорогостоящем оборудовании и являются весьма трудоемкими. Так при изготовлении высокоточных изделий время, затрачиваемое на проведение промежуточных измерений, может достигать до 50% времени от суммарной трудоемкости технологического процесса окончательной обработки. Поэтому для получения заключений о качестве изделий в процессе обработки прибегают к использованию метода мониторинга процесса обработки.

Метод мониторинга заключается в динамическом контроле параметра процесса притирки, который косвенным образом свидетельствует о состоянии качества обрабатываемых поверхностей. Для методов абразивной обработки в качестве контрольного параметра мониторинга используется параметр вибрации, возникающей в зоне притирки.

На текущий момент наибольшую популярность приобрели методы математического моделирования и мониторинга вибрационного параметра процесса притирки. Поэтому использование данных методов легло в основу проведенного исследования.

1.2.2 Сравнительный анализ математических моделей процесса притирки

Традиционно основным выходным параметром математических моделей процесса притирки выступает скорость съема материала (далее – ССМ), которая основывается на различных аналитических моделях. Среди типовых моделей можно выделить следующие:

Первая модель СММ (мкм/мин) Н.И. Богомолова описывается следующим уравнением [9]:

$$СММ = C_q \cdot v \cdot p_{уд}^\gamma \cdot d^\delta \cdot W^\xi \cdot S^m, \quad (1.1)$$

где C_q – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала абразива и других условий обработки;

v – скорость притирки;

$p_{уд}$ – давление на обрабатываемой поверхности;

d – средний размер основной фракции абразивного порошка;

W – концентрация порошка в жидкой фазе по массе;

S – площадь контакта обработанной и рабочей поверхностей инструмента.

γ, δ, ξ, m – коэффициенты, $\gamma=0,7 \dots 1,0$; $\delta=0,5 \dots 0,7$; $\xi=0,7$; $m=0,3$.

Представленная модель обладает следующими достоинствами: учет концентрации абразива по массе и учет размера зерна. Среди недостатков модели можно выделить следующие: параметр скорости v не имеет степенного показателя, что противоречит графикам влияния скорости на производительность процесса притирки; параметр скорости – константа; параметр давления – константа; параметр площади не согласуется с величиной съема припуска; отсутствует учет соотношения твердости в явном виде.

Вторая модель СММ (мкм/мин) Ф.В. Престона описывается следующим уравнением [20]:

$$СММ = c \cdot v \cdot p, \quad (1.2)$$

где c – коэффициент технологический, определяемый универсально;

p – давление;

v – относительная скорость движения.

Представленная модель обладает следующими достоинствами: относительная простота модели, легко адаптируется под локальный съем припуска. Недостатки модели: влияние всех технологических факторов сведено в единый фактор, линейный характер влияния скорости и давления притирки на съем припуска.

Третья модель СММ (мкм/мин) М.Н. Семибратова [2]:

$$СММ = K \cdot F_r \cdot v_r \cdot S_r, \quad (1.3)$$

где K – коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала абразива и других условий обработки;

F_r – сила взаимодействия детали с притиром;

v_r – скоростной коэффициент;

S_r – коэффициент покрытия.

Достоинства модели: достаточно точное определение величины съема припуска; модель базируется на механической работе. Недостатки модели: линейность влияния силы и скорости на процесс; отсутствие строгого описания влияния скорости на силу; разделение на динамический и кинематический съем припуска; отсутствует учет соотношения твердости в явном виде.

Четвертая модель СММ (мкм/мин) П.Н. Орлова [3]:

$$СММ = \sum C \cdot k \cdot \int v dt, \quad (1.4)$$

где C – интенсивность изнашивания материала;

k – коэффициент динамичности нагружения системы;

v – скорость притирки;

t – время обработки.

Достоинство модели: учет распределения давления по обрабатываемой поверхности. Недостатки модели: необходимо физическое моделирование для установления значения интенсивности изнашивания и коэффициента динамичности; не универсальность модели.

В силу простоты модели Ф.В. Престона [20] большинство современных авторов за основу своих имитационных САЕ-моделей берут именно ее. Однако уравнение не применимо напрямую для прогнозирования изменения профиля поверхности заготовки, так как оно является экспериментальным. Многие исследователи опубликовали аналитические работы, чтобы проверить или пересмотреть уравнение Престона. Рассмотрим некоторые из них.

Р. Аспден и соавторы [21] разработали модель, базирующуюся на совместно методе компьютерно-оптического формирования поверхности. В основу модели заложено уравнение Престона. Модель предназначена для повышения качества и геометрии оптических поверхностей. В качестве входных параметров модели используются результаты измерения геометрии линзы, размеры инструмента и параметры рабочего процесса притирки. Особенность модели заключается в учете влияния съема припуска с притира. Данная модель предназначена для прогнозирования индивидуальной притирки оптических линз.

П.П. Хед [22] разработал модель, которая рассчитывает ССМ по всей поверхности заготовки без учета распределения локальных значений ССМ, зависящего от совокупности технологических и динамических факторов.

Д.С. Ламброполус и соавторы [23] разработали модель ССМ, учитывающую влияние физико-механических свойств обрабатываемого материала и размер абразивного зерна. Так авторам удалось показать рост значения коэффициента Престона с увеличением твердости материала. Также модель позволяет оценить уровень напряжений и наличие трещин в притираемом поверхностном слое детали.

С. Дж. Эванс и соавторы [24] учитывали в модели увеличение площади контакта поверхностей в результате притирки. В основе модели использовалось классическое уравнение Престона. При моделировании авторы исходили из

гипотезы, что притирка и полировка имеют одинаковые механизмы взаимодействия между четырьмя компонентами процесса: заготовка, абразив, абразивная жидкость и притир. Разница между процессами состоит в относительном размере компонентов между собой и не является существенной в силу малости размеров абразива.

Некоторые исследователи [25-27] предложили аналитические модели, которые пересмотрели степень влияния контактного давления и относительной скорости на ССМ.

В соответствии с их теоретическими работами и экспериментальными данными влияние этих параметров на ССМ носит нелинейный характер. Ф. Занг и соавторы [25] определили, что силовое замыкание единичного зерна выражается через давление, размер фракции абразивного зерна и концентрацию абразивной фазы в суспензии. Ф.Г. Ши и соавторы [26] установили различие между механизмами оказания давления жестким и мягким притиром.

В.Т. Цэнг и соавторы [27] установили наличие зависимости коэффициента съема припуска от давления и скорости. В другой своей работе [28] авторы предложили альтернативную модель съема припуска, которую можно рассматривать как модификацию уравнения Престона. Отличие от традиционного уравнения заключается в том, что добавляются характеристики съема припуска абразивов в процессе притирки. Также авторы переосмыслили учет фактора скорости притирки введя коэффициент неравномерности распределения скорости по площадке контакта. Предложенная авторами модель описывается следующим уравнением:

$$CCM = k_c \cdot P \cdot V \cdot e^{\beta \cdot V}, \quad (1.5)$$

где k_c — коэффициент Престона, относящийся к свойствам суспензии и включающий такие параметры, как концентрация, температура и размер абразивных зерен;

P — контактное давление на поверхности;

V — скорость притирки;

β — коэффициент потери режущей способности абразивной суспензии;

e — экспонента.

Большинство вышеизложенных моделей [21-28] базируются на уравнении Престона как на модели расчета съема припуска в процессе притирки. Эти модели, основанные на уравнении Престона, могут прогнозировать ССМ. Однако в моделях трудно предсказать распределение ССМ по притираемой поверхности. Это связано с тем, что в них рассматривается теоретический профиль поверхности заготовки, а не истинный и меняющийся во время притирки. Контактное давление и коэффициент Престона используются в таких моделях в виде средних значений величин по всей обрабатываемой поверхности, что отличается от действительных значений параметров в локальных точках обрабатываемой поверхности. Без учета фактического распределения контактного давления и коэффициента Престона невозможно точно предсказать изменение профиля поверхности в процессе притирки, и как следствие учесть распределение ССМ.

Поскольку контактное давление и коэффициент Престона оказывают ключевое влияние на динамику изменения геометрии заготовки, то для точного прогнозирования

рельефа поверхности необходимо знать закон распределения контактного давления и коэффициента Престона по обрабатываемой поверхности в процессе притирки. Расчет распределения давления под действием приложенной нагрузки и характера контакта заготовки с притиром является ключевым элементов в прогнозировании распределения ССМ заготовки и притира.

М. Джин и соавторы [29] провели эксперимент по оценке распределения контактного давления в процессе притирки. Для этого они установили, с фиксированным шагом по сетке, датчики давления на обратной поверхности заготовки для измерения распределения давления в процессе экспериментальной притирки и полировки. Результат продемонстрировал, что давление в зоне притирки распределяется неравномерно. Полученную неравномерность авторы учли в модели ССМ путем добавления параметра компенсации смещения заготовки. Также этот параметр учитывает и величину контактных напряжений на притираемой поверхности. В основу разработанной авторами модели заложено следующим уравнение:

$$CCM = k_c \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \omega \cdot r, \quad (1.6)$$

где k_c — коэффициент Престона, относящийся к свойствам суспензии и включающий такие параметры, как концентрация, температура и размер абразивных зерен;

E — модуль Юнга притирочной пластины;

ε — контактная жесткость притирочной пластины;

ω — скорость вращения притира;

r — расстояние от оси вращения притира до точки, в которой прогнозируется съём припуска.

В. Ли и соавторы [30] рассматривали распределение коэффициента Престона как нелинейная совокупность влияния технологических и динамических факторов, за исключением контактного давления в зоне притирки. Также авторы разработали методику расчета геометрии канавок на притире для равномерного распределения абразива в зоне притирки.

С.В. Лю и соавторы [31] рассмотрели распределение давления и разработали модель съема припуска для химико-механического полирования (далее - ХМП). Модель учитывает физико-механические свойства абразива, что позволяет более достоверно рассчитывать ССМ.

К.С. Чен и соавторы [32] использовали упрощенную модель съема припуска в сочетании с общим методом конечных элементов (далее – МКЭ). Разработанная модель позволяет получить качественный прогноз распределения напряжений в поверхностном

слое заготовки и притира. Также авторы предложили схему неравномерного нагружения для снижения влияния краевого эффекта.

Д. Тичи и соавторы [33] разработали модель съема припуска, учитывающую гидродинамический эффект образования зон пониженного и повышенного давления суспензии в области притирки.

И. Ху и соавторы [34] использовали для расчета распределения контактного давления модель упругого полупространства в виде притира, контактирующего с абсолютно твердой деталью. Модель позволяет рассчитать необходимое давление в различных кольцевых зонах на поверхности заготовки и притира для стабилизации процесса ССМ. Также авторы предотвратили возникновения краевого эффекта путем добавления внешней кольцевой обоймы для заготовки.

Описанные выше модели [29-34] предназначены для описания процессов ХМП и притирки. Используемые в этих моделях уравнения подходят для описания процесса съема припуска мягкими притирами, поскольку позволяют учесть наличие значительных деформаций притира в процессе обработки. Для описания процесса притирки твердыми притирами необходимо учесть распределения пятна контакта в процессе обработки.

А.Т. Ким и соавторы [35] смоделировали притирочную пластину как простую модель упругого основания Винклера для расчета напряжения на контактной поверхности, вызванного давлением равномерно распределенного абразива и гидродинамической силой. Гидродинамическая сила возникает в следствии момента силы трения, вызывающего наклон заготовки. В результате возникают участки повышенного и пониженного гидродинамического давления в зоне притирки.

К. Джин и соавторы [36] выбрали аналогичную модель для оценки контактного давления и давления жидкости в процессе ХМП. Особенность модели заключается в том, что авторы также учли влияние неравномерности шероховатости поверхности притирка на образование участков повышенного и пониженного гидродинамического давления в зоне притирки.

В исследованиях [35, 36] рассчитывалось распределение контактного давления на основе гипотезы о том, что профиль поверхности заготовки и притирочной пластины плоский. Таким образом приведенные модели не учитывают физическое несоответствие поверхности раздела заготовки притирочной пластины.

Р.И. Вагнер и соавторы [37] установили, что контактное давление между инструментом и заготовкой динамически изменяется. Это происходит вследствие того, что заготовка и инструмент изменяют профиль поверхности сложным образом. Разработанная авторами модель дает более высокую степень точности при расчете

контактного давления, чем рассмотренные ранее модели, в которых заготовка и инструмент имели плоскую поверхность.

Т. Суратвала и соавторы [38, 39] предположили, что неравномерное распределение контактного давления возникает из-за момента силы трения в точке поворота, вызванного силой трения на границе раздела, а также физическим несоответствием границы раздела у заготовки и притира. Авторы при разработке модели сосредоточились на том, как ограничить неравномерность износа притира, но не учли фактор распределения контактного давления и исходный профиль заготовки.

В некоторых исследованиях [36-38] демонстрируется значительное влияние распределения коэффициента Престона при расчете распределения ССМ. Некоторые исследователи [40-43] при разработке модели указывали коэффициент Престона как константу. Такое допущение приемлемо при учете нелинейности влияния давления и скорости на ССМ. Нелинейность влияния факторов на ССМ легко доказывается физическим аспектом процесса внедрения абразива в заготовку. Во-первых, глубина внедрения абразивного зерна в материал заготовки не пропорциональна силе, приложенной к этому зерну. Во-вторых, прочность материала заготовки зависит от скорости приложения нагрузки.

Так, например, Д.В. Ким и соавтор [41] предложили модель, в которой распределение давления в зоне контакта происходит по закону Гауса. Расчет вектора результирующей скорости производится с учетом деформации эластичного притира и угла наклона оси вращения инструмента. Предложенная авторами формула для расчета ССМ выглядит следующим образом:

$$CCM = k_c \cdot P_T \cdot \exp\left(-\frac{\lambda^2 \psi}{2\sigma^2}\right) \cdot \sqrt{\left[(V_{TRx} + V_{TFx})^2 + (V_{TRY} + V_{TFy})^2 \right]}, \quad (1.7)$$

где k_c — коэффициент Престона, относящийся к свойствам суспензии и включающий такие параметры, как концентрация, температура и размер абразивных зерен;

P_T — максимальное давление в зоне притирки;

λ — расстояние от центра притира до точки контакта;

σ — величина стандартного среднеквадратичного отклонения;

ψ — поправочный коэффициент для распределения давления;

$V_{TRx}, V_{TFx}, V_{TRY}, V_{TFy}$ — проекции векторов скорости точек притира от вращения вокруг своей оси и оси заготовки на оси OX и OY.

Р. Пан и соавторы [44] при разработке модели добавили в нее коэффициент трения между притиром и заготовкой, чтобы исключить нелинейность коэффициента Престона.

Представленная авторами модель использует общий коэффициент трения в зоне контакта, без учета его перераспределения по обрабатываемой поверхности.

Л. Теллос-Арриага и соавторы [45] предложили модифицировать уравнение Престона, включив в него коэффициент трения, зависящий от скорости притирки. Согласно проведенным авторами кинематическим расчетам разница в распределении ССМ незначительна для основного диапазона скоростей притирки и имеет лишь критическое значений для низкоскоростного режима. В модели предусмотрено равномерное распределение давления по притираемой поверхности.

М.Я. Янг и соавтор [46] разработали модель, в которой значение коэффициента Престона находится из экспериментальных данных средней величины линейного съема припуска по толщине заготовки на эллиптической поверхности. Модель предназначена для индивидуальной оптической притирки на станках с ЧПУ мягкими сферическими притирами. Распределение давления в зоне контакта рассчитывается по закону Гаусса.

Г. Фу и соавтор [47] исследовали образование краевого эффекта на обрабатываемой поверхности заготовки. Разработанная авторами модель демонстрирует, что равномерное давление на обратной поверхности заготовки также приводит к краевому эффекту на границе притираемой поверхности.

В. Сюй и соавторы [48] исследовали влияние вибраций на процесс притирки и установили, что вибрации интенсивно повышают производительность процесса притирки. Также авторы подтвердили, что механическое воздействие абразивных зерен на заготовку является основным фактором ССМ. Авторы предложили внести учет влияния приложенной вибрации в виде закона приращения контактной силы.

Я. Ши и соавторы [49] предлагают новую модель, которая позволяет также управлять роботом в процессе притирки с динамическим контролем силы давления в зоне обработки. Благодаря использованию мониторинга вибрационного параметра в процессе притирки удастся достичь улучшения шероховатости поверхности на 37% по сравнению с методом без мониторинга. Предложенная авторами модель предназначена для условий индивидуальной притирки мягкими сферическими притирами.

Л. Янг и соавторы [50] разработали модель съема припуска с рабочей поверхности детали с учетом влияния перераспределения абразивных зерен по обрабатываемой поверхности. Модель учитывает влияние скоростного режима на характер распределения абразивных зерен в зоне обработки посредством ввода поправочного динамического коэффициента. Разработанная авторами модель предназначена для прогнозирования съема припуска на чистовых стадиях обработки плоских поверхностей. При длительном процессе притирки возникают локальные участки повышенного съема припуска, которые

оказывают дополнительное влияние на закон перераспределения давления и абразивных зерен.

П. Жоу и соавторы [51] разработали модель съема припуска с рабочей поверхности детали с учетом влияния неоднородности структуры поверхностного слоя. Модель позволяет при использовании мягкого притира точно определить величину перераспределения контактного давления и ССМ. Улучшенный вариант модели [52] учитывает влияние потока стружки и неравномерности профиля заготовки. Предложенная авторами модель хорошо описывает процесс притирки при большой величине съема припуска на границе заготовки из-за краевого эффекта.

З. Гэн и соавторы [53] разработали модель съема припуска в процессе притирки, учитывающую изменение профиля поверхности заготовки и притирочной пластины во время притирки. Также модель учитывает динамический угол наклона заготовки под действием момента силы трения. Разработанная авторами модель изменения профиля поверхности базируется на уравнении Престона и модели упругого основания Винклера. Для упрощения расчета профиля поверхности в процессе притирки краевой эффект и удары абразивных зерен учитываются в распределении коэффициента Престона, а коэффициент взаимодействия абразивных зерен калибруется по результатам опытной притирки. Физическое несоответствие рельефа поверхности заготовки и притирочной пластины, а также наклон заготовки учитываются как ключевые факторы неравномерного распределения контактного давления. Учет этих факторов существенно повышает точность прогнозирования профиля поверхности, что имеет большое значение для повышения автоматизации и управляемости процесса притирки. Особенность полученной авторами модели заключается в том, что она имеет сложную иерархичную структуру. Рассмотрим более подробно основные структурные элементы модели.

В вершине иерархии заложена модель прогнозирования распределения ССМ, которая была разработана на основе традиционного уравнения Престона. В этой модели средние значения контактного давления и относительной скорости заменены локальными выражениям. Локальная ССМ определяется следующей формулой:

$$ССМ(\theta, r) = K(\theta, r) \cdot P(\theta, r) \cdot V(\theta, r), \quad (1.8)$$

где $K(\theta, r)$ — локальный коэффициент Престона, относящийся к свойствам суспензии и включающий такие параметры, как концентрация, температура и размер абразивных зерен.

$P(\theta, r)$ — локальное контактное давление на поверхность.

$V(\theta, r)$ — локальная скорость притирки.

r — расстояние от точки на поверхности заготовки до центра заготовки.

θ — угол точки на поверхности заготовки.

На второй ступени иерархии расположены модели распределения скорости, контактного давления и коэффициента Престона.

Модель распределения скорости притирки рассчитывается на основе кинематической модели притирочного станка и зависит от времени и координат точки притираемой поверхности на заготовке аналогично модели Кима [41].

Модель распределения контактного давления $P(\theta, r)$, вызванного деформацией, рассчитывается по уравнению упругого основания Винклера:

$$P(\theta, r) = (1-\nu) \cdot E \cdot (\delta - z(\theta, r)) / (L \cdot (1+\nu) \cdot (1-2\nu)), \quad (1.9)$$

E — модуль Юнга материала притирочной пластины, ГПа;

ν — коэффициент Пуассона материала притирочной пластины;

L — длина линейной упругой пружины, примерно равная толщине притирочной пластины, мм;

$z(\theta, r)$ — расстояние между контактными поверхностями заготовки и притирочной пластины, мкм;

δ — величина максимального сжатия пружины среди локальных участков, мкм.

Расчет угла наклона заготовки производится по методу секущей Ньютона и алгоритму Ньютона-Рафсона. Фактор угла наклона заготовки оказывает ключевое влияние на перераспределение контактного давления.

Распределение коэффициента Престона производится по результатам проведения лабораторного эксперимента путем итерационно-поискового метода расчета.

Представленная авторами модели обладает высокой предстательной способностью и предназначена для исследования плоской дисковой притирки. При необходимости прогнозирования оптимального времени притирки с другими исходными параметрами заготовки или рабочих условий, требуется повторное проведение эксперимента, так как модель является полуэмпирической.

Т. Деконаску и соавтор [54] разработали модель ССМ в процессе притирки с учетом фактора формы абразивных зерен. Поскольку абразивные зерна отличаются друг от друга, авторы предложили моделировать процесс абразивного съема припуска на основе нормального распределения размеров зерен каждой фракции. Таким образом разработанная модель имеет высокую степень соответствия реальным условиям в зоне контакта частиц с заготовкой и притиром. В разработанной модели абразивные зерна имеют объемную и компактную форму, что позволяет воспрепятствовать ориентации зерен только в определенных направлениях. Предложенная авторами модель ССМ базируется на следующих гипотезах:

- Абразивные зерна имеют сферическую форму;
- К площади контакта применяются формулы контактного напряжения Герца между абразивным зерном и обрабатываемой поверхностью;
- Материалы заготовки и притирочной плиты изотропны, а контактное напряжение равномерно распределено;
- Не учитывается явление наклепа;
- Размер стружки вокруг зерна пренебрежимо мал по сравнению с размерами зерна.

В разработанной модели помимо ССМ пользователям выводятся следующие данные: время обработки (мин), высота удаляемого слоя материала (мкм), скорость потока абразива (мм³/мин) и необходимая масса абразива (г).

Предложенная авторами модель носит теоретический характер. Эмпирическую проверку авторы собираются произвести в дальнейших лабораторных исследованиях.

Л. Зао и соавторы [55] разработали модель ССМ в процессе притирки с учетом возможности автоматической правки притира в процессе обработки. В основу модели заложено условие минимизации влияния температурного расширения притира, возникающего в процессе притирки, оказывающего влияние на качество обрабатываемой заготовки. Авторы предлагают новую систему управления станком, которая позволяет осуществлять правку поверхности притирочной пластины в процессе обработки для достижения требуемой формы. Система управления осуществляет мониторинг состояния динамической системы в зоне притирки и производит своевременную правку притира, что позволяет избежать неравномерного износа притирочной плиты. В качестве параметра отклика динамической системы используется температура поверхности притирочной плиты. Измерение производится бесконтактным методом при помощи тепловизора. На основе полученной информации о температурном поле поверхности притира, модель производит расчет температурной деформации притира в процессе обработки, а система управления станком в режиме реального времени корректирует управляющую программу. Таким образом, производится автоматическая правка контактной поверхности притира и удается компенсировать неравномерность температурных деформаций на поверхности притирочной плиты.

Полученная модель особенно актуальна в условиях высокоскоростной притирки без постоянной подачи абразивной суспензии. Основные достоинства модели заключаются в том, что она учитывает тепловые деформации в процессе обработки, позволяет реализовать схему притирки с автоматической правкой притира и увеличивает срок службы инструмента. Основные недостатки: требует наличия дорогостоящего

оборудования; требует высокой квалификации работника; применима для индивидуальной притирки.

Подводя итог вышеизложенному, можно сделать заключение, что регрессионные модели подходят для плоской притирки, имеют погрешность порядка 30% и весьма трудоемки для расчетов. САЕ-модели имеют погрешность в пределах 1-15%, однако, требуют больших трудозатрат на предварительное измерение деталей и проведение расчетов.

Поскольку применяемые на практике способы повышения эффективности притирочных операций увеличивают время на вспомогательные работы или создают необходимость введения дополнительных операций, то разработка нового способа, лишенного данных недостатков, является актуальной задачей.

1.2.3 Анализ методов мониторинга и диагностики вибраций абразивной обработки

Диагностирование состояния технологических операций на производстве в последнее время приобретает все большую популярность, так как благодаря диагностике удастся своевременно прервать производственный цикл, не допустив возникновения брака обрабатываемого изделия или поломки технологического оборудования. Наиболее прогрессивным направлением в диагностировании является мониторинг состояния технологической операции и оборудования непосредственно в момент обработки изделия. Такой подход позволяет максимально эффективно реализовать производственную деятельность, снижая риски прерывания технологических цепочек.

В области методов механической обработки в качестве основного параметра мониторинга рабочего процесса выступают вибрации возникающие в зоне обработки [56]. Исследователи из научного сообщества предложили различные подходы к оценке состояния рабочего процесса обработки.

А.А. Деев провел работу [57] по исследованию акустических колебаний в процессе трения как метода контроля состояния поверхностей трения при приработке двигателей внутреннего сгорания. Основная идея работы заключается в том, что при трении материалов возникают механические упругие волны, которые несут информацию о состоянии поверхностей трения, наличии дефектов и протекающих процессах разрушения. Автор отметил, что эти колебания можно использовать для диагностики состояния трибосистемы в реальном времени.

А.В. Баранов и соавторы [58] провели комплексное исследование характеристик фрикционного контакта стальных поверхностей, основанное на одновременном использовании различных методов неразрушающего контроля. Особое внимание авторы уделили акустическому мониторингу ультразвукового излучения в диапазоне свыше 30 кГц. В результате ими было установлено, что многопараметрический контроль позволяет получать полную картину состояния фрикционного контакта через одновременное измерение уровня акустического излучения и спектрального состава колебаний.

Некоторые исследователи [59-60] рассмотрели применение метода АЭ для изучения механизмов изнашивания при трении скольжения. Проведенные исследования фокусируются на анализе акустического отклика двух пар трения: одна с хрупким разрушением, другая с интенсивной пластической деформацией. Результаты показали, что метод АЭ перспективен для изучения механизмов, протекающих в зоне трения. Так в исследованиях отмечается, что при возрастании коэффициента трения появляется высокочастотная (далее – ВЧ) составляющая и изменения коэффициента трения сопровождаются аналогичными изменениями медианной частоты.

А.Ю. Смолин и соавторы [61] провели работу по исследованию акустических колебаний, возникающих при трении скольжения, с помощью методов частотно-временного анализа. Авторы продемонстрировали возможности вейвлет-преобразования для определения частотно-временной структуры акустических сигналов при трении и установили связи между параметрами сигнала и характеристиками процесса изнашивания. Результаты исследования демонстрируют возможность разработки методики по оцениванию процесса формообразования поверхности.

М.П. Козочкин лично и с соавторами провели ряд исследований [62-65] по выявлению и систематизации ВА явлений, возникающих при трении, а также формированию способов их применения в технической диагностике. Так в работе [62] предлагается модель, которая описывает формирование и характеристики акустических колебаний в условиях сухого трения. Модель учитывает влияние различных факторов, таких как адгезионные связи, скорость трения и параметры контакта. В другой своей работе [63] автор выявил закономерности изменения характеристик АЭ в процессе обработки и определил основные факторы, влияющие на формирование акустического сигнала при шлифовании. В составе исследовательского коллектива М.П. Козочкин [64] выявил корреляцию между параметрами ВА сигнала и съемом припуска оксидно-карбидной керамики при трении о стальной диск. Авторами было установлено, что существует связь, которая подходит для разработки методов вибродиагностики состояния

керамических режущих инструментов и деталей трибоузлов. В следующей работе М.П. Козочкин вместе с соавторами [65] установил особенности процесса резания при использовании единичного абразивного зерна в условиях сухого трения и при применении смазочных материалов. Исследователи выявили, что мощностные характеристики АЭ (амплитуда, среднеквадратичное значение сигнала, сила сигнала, энергия) возрастают с увеличением глубины резания, средний амплитудный уровень АЭ при резании в условиях сухого трения выше, чем при использовании смазки. Объясняются полученные результаты тем, что отсутствие смазки в зоне контакта приводит к формированию значительных площадок износа абразивного зерна со следами адгезионного налипания обрабатываемого материала. В результате помимо резания материала наблюдается существенная пластическая деформация с формированием навалов по обеим сторонам профиля микрорельефа независимо от исходной геометрии зерна. Использование смазочных сред, особенно при резании острым зерном, позволяет минимизировать образование навалов.

Т. Осада и соавторы [66] провели исследование по возможности использования мониторинга акустического сигнала для контроля шероховатости поверхности в процессе притирки. Использование разработанного авторами метода контроля позволяет своевременно прекратить процесс притирки, достигнув требуемого значения шероховатости обрабатываемой поверхности.

Рассмотренные выше работы демонстрируют возможность применения методов мониторинга ВА сигнала в условиях ВСП как для оценки качества обрабатываемой поверхности, так и для определения состояния режущей способности абразивной суспензии в процессе притирки.

1.2.4 Формирование нового метода повышения эффективности притирки

В основе нового метода повышения управляемости качеством обрабатываемых изделий предлагается использовать синтез имитационного моделирования с динамическим мониторингом вибрационного параметра процесса притирки.

В качестве рабочей гипотезы выдвинуто предположение, что параметры ВА сигнала, возникающие в сферическом соединении, коррелируют с отклонением от сферичности сопрягаемых поверхностей в соединении, а имитационное моделирование позволяет установить рациональные режимы обработки для изделия с установленными параметрами качества сферического соединения.

Основанием рабочей гипотезы является полученное в результате анализа научно-технической литературы заключение о физике протекания процесса притирки. Поскольку основным процессом съема припуска является механический, то посредством характеристик механического процесса можно судить о характере съема припуска в зоне притирки. Обязательным условием протекания процесса притирки является наличие силового замыкания между элементами системы деталь-абразив-притир/деталь-абразив-деталь. Силовое замыкание возникает в местах, где зазор между притираемыми деталями не превышает размер крупной фракции зерна суспензии. Чем больше мест возникновения силового замыкания, тем больше зерен участвует в обработке и, следовательно, необходимо больше энергии для реализации процесса притирки. Таким образом можно полагать, что параметры ВА сигнала в сферическом соединении должны коррелировать с отклонением от сферичности изделия.

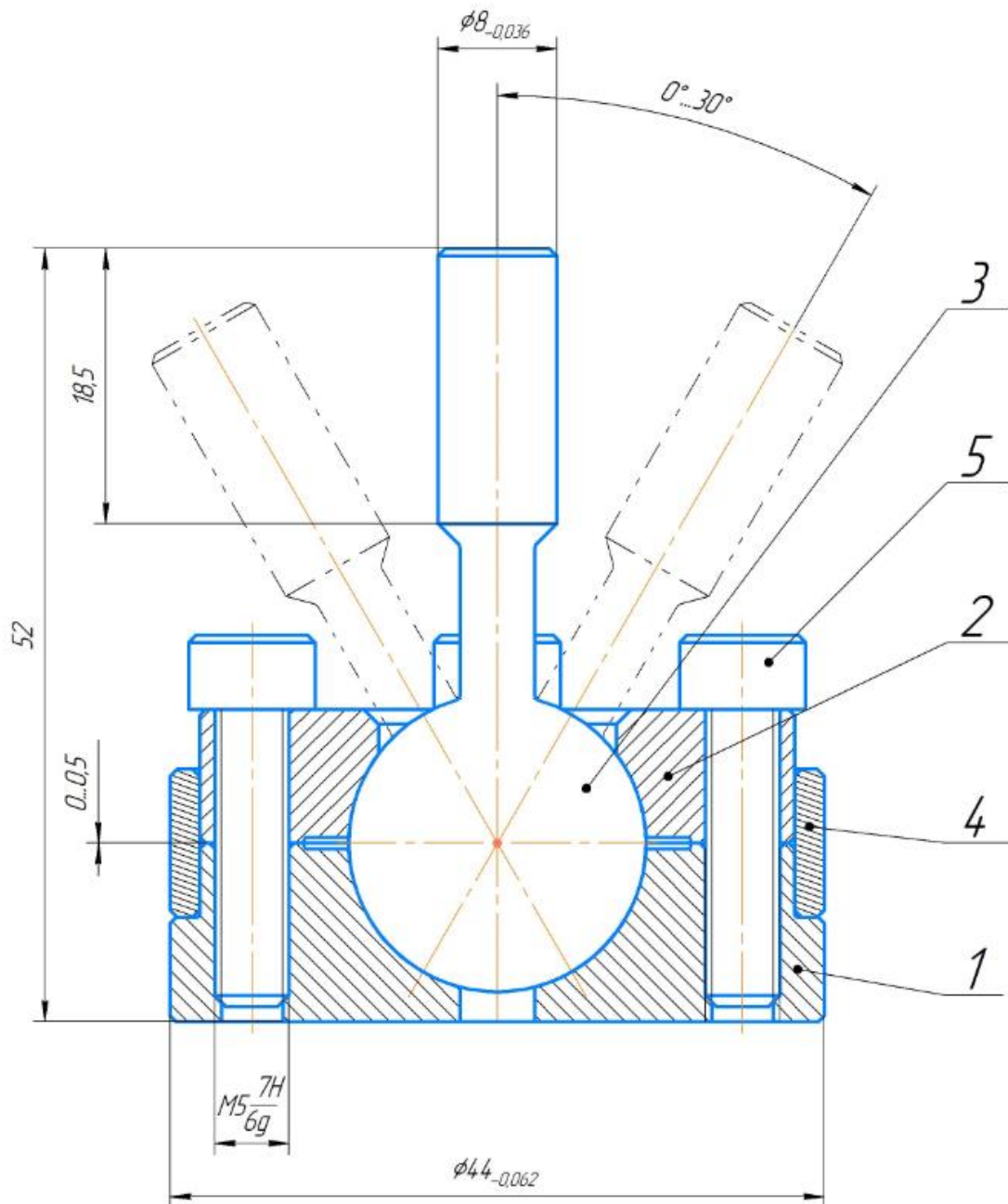
Таким образом полученные в ходе анализа суждения являются теоретическим обоснованием справедливости сформулированной рабочей гипотезы. На последующих этапах исследования необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Определить типовое изделие для анализа.
2. Спроектировать и собрать сферопритирочный стенд для проведения экспериментального исследования процесса притирки.
3. Разработать имитационную модель процесса ВСП.
4. Осуществить планирование и проведение эксперимента по исследованию характеру съема припуска с контактных поверхностей деталей, возникающего в процессе ВСП, и установить связи параметров ВА сигнала с качеством сферического соединения и состоянием процесса обработки.
5. Формирование рекомендаций и предложений по промышленному внедрению полученных результатов.

1.3 Выбор и описание изделия для взаимной сферической притирки

Сферическая кинематическая пара часто встречается в различных механизмах со сложной кинематикой. Особенность таких пар заключается в высокой несущей способности и обеспечении дополнительной подвижности, препятствующей заклиниванию механизма в результате упругих деформации звеньев. Частными случаями изделий со сферической кинематической парой являются шаровые шарниры и опоры. К изделиям предъявляются высокие технические требования к геометрической точности и шероховатости сферических поверхностей.

В качестве типового изделия был выбран трехкомпонентных шаровой шарнир, состоящий из крышки, подпятника, шарового пальца и крепежа (рисунок 1.4). При этом в подпятнике предусмотрено осевое технологическое отверстие. Оно предназначено для выхода резца при предварительной обработке сферической поверхности и для удаления отработанной притирочной смеси из зоны притирки.



1 – Подпятник; 2 – Крышка; 3 – Шаровой палец; 4 – Кольцо; 5 – Крепеж

Рисунок 1.4 – Шаровой шарнир

Диаметр сферического соединения был назначен 20 мм. Угол наклона шарового пальца от вертикального положения до 30 град. При таком конструктиве шаровой шарнир способен воспринимать разнонаправленные нагрузки и обладает высокой подвижностью.

1.4 Выводы по первой главе

1. Рассмотрение процесса притирки показало, 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. Причем основным механизмом съема припуска выступает механический процесс.

2. Было установлено, что на производительность и качество процесса притирки влияет множество факторов, которые принято разделять по следующим группам: технологические, динамические, кинематические и геометрические. Ввиду большого количества факторов процесс наладки процесса притирки является весьма трудоемким.

3. Обзор литературных источников показал, что основными методами повышения эффективности притирки являются: метод разделения технологических операций, экспериментально-поисковый метод, метод математического моделирования процесса, метод мониторинга процесса обработки, комбинированный метод. 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 притирки. Однако такие модели требуют наладки при изменении технологических условий или конструктива притираемого изделия. Поэтому для дополнительного повышения эффективности в части определения качества сферического соединения необходимо производить мониторинг процесса обработки.

4. 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. 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. Также были определены конструктивные параметры типового изделия для исследования процесса ВСП.

2 ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения исследования процесса ВСП требовалось выбрать необходимое оборудование.

Предварительный анализ имеющегося в свободной продаже притирочного оборудования показал, что под конкретный вид изделия «Шарнир шаровой» отсутствует необходимое оборудование. Наиболее близкий по задаче станок «Rotago», предназначенный для притирки шаровых кранов от фирмы «EFCO», был взят в качестве прототипа при проектировании стенда для ВСП шаровых шарниров [67]. Конструкция станка включает в себя три независимых шпинделя, суппорт с возвратно-качательным приводом, станину, систему управления и защитные кожухи.

Технически задачу реализации процесса ВСП деталей шаровых шарниров возможно решить посредством роботизированной руки [68]. Однако поскольку дальнейшее исследование предполагает создание автоматизированного притирочного комплекса с динамическим мониторингом ВА параметров процесса притирки, то необходимо будет учитывать измеренные параметры при генерации стратегий обработки. Следовательно, потребуется разработка и внедрение ПО для управления оборудованием, а имеющиеся роботизированные руки используют закрытое ПО без права редактирования. К тому же кинематика такого робота избыточна для задачи ВСП в силу высокой мобильности, что усложняет процесс расчета кинематики робота при описании стратегии обработки.

В силу вышеизложенных обстоятельств было принято решение о разработке специализированного стенда для ВСП деталей шаровых шарниров.

2.1 Разработка притирочного стенда

Разработка притирочного стенда состояла из последовательного выполнения следующих этапов проектных и технологических работ: декомпозиция состава стенда, разработка кинематической схемы, 3D-моделирование стенда, разработка программного комплекса управления стендом, сборка и наладка стенда.

В ходе проработки последующих этапов производилось уточнение по результатам выполнения предыдущих и по необходимости вносились изменения.

Разработка стенда производилась за счет средств грантов от организации ФГБУ ФСИ по договорам № 1874ГССС15-L/88337 и № 17640ГУ/2022.

2.1.1 Декомпозиция оборудования

На первом этапе разработки станда был определен компонентный состав оборудования. 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 таблице 2.1.

Таблица 2.1 – 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

По результатам декомпозиции были сформированы общие требования по каждой системе. Так же были определены принципиальные технические решения, необходимые для проектирования.

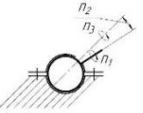
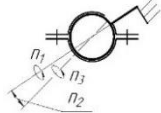
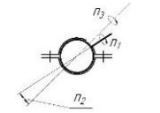
Для минимизации веса станда, в обеспечении его повышенной мобильности, было принято решение о использовании деталей из алюминиевых сплавов в составе несущей системы.

2.1.2 Разработка кинематической схемы

Следующим этапом разработки станда было проектирование принципиальной кинематической схемы оборудования. Кинематическая схема определяет подвижность и связи кинематических элементов системы главных движений станда. На первом этапе проектирования были определены и рассмотрены базовые способы движения выходного звена. По результатам проведенного анализа базовых способов движения были установлены достоинства и недостатки каждого способа (таблица 2.2). По результатам сравнительной для оценки дальнейшего проектирования был выбран способ №1.

Далее для выбранного базового способа движения были разработаны несколько видов кинематических схем реализации кинематики притирочного станда, которые различаются по степени независимости приводов главного движения (рисунок 2.1).

Таблица 2.2 – Характеристика способов движения выходного звена

Характеристика	Способ №1	Способ №2	Способ №3
Изображение			
Удаленность рабочих органов от зоны притирки	+	-	-
Малая инертность тел вращения	-	-	+
Статичность установочной базы	+	-	-
Статичность баз систем оказания давления и подачи рабочей смеси	+	-	-

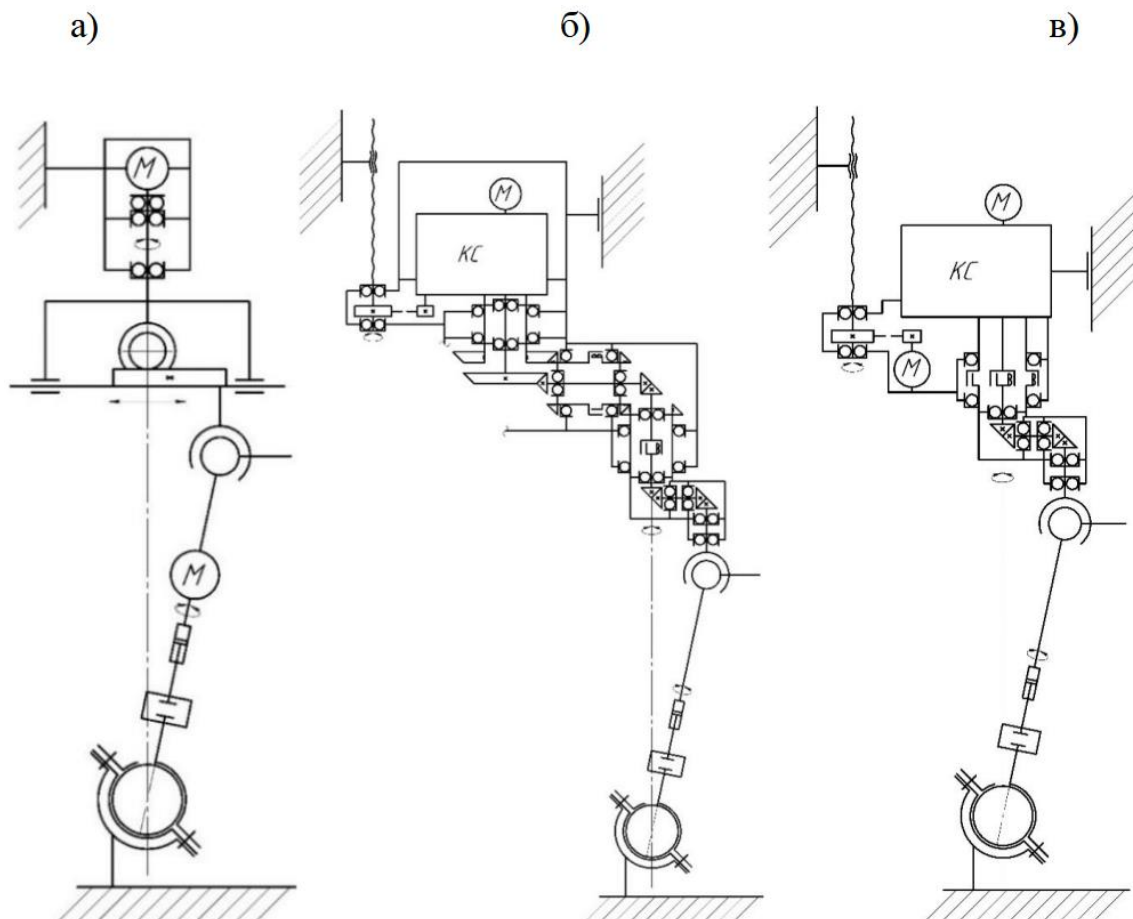


Рисунок 2.1 – Кинематические схемы: а – №1; б – №2; в – №3

Затем был проведен сравнительный анализ кинематических схем и определены их достоинства и недостатки. Полученные результаты анализа были сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Сравнение кинематических схем привода главного движения

Характеристика	Кинематическая схема		
	№1	№2	№3
Относительно высокая точность	+	-	+/-
Относительно высокая надежность	+	-	+/-
Возможность реализации пакетной схемы обработки	-	+	-
Относительно малая инертность вращающихся масс	+	-	+/-
Высокий КПД	+	-	+/-
Простая сборка и наладка станда	+	-	+/-
Относительно невысокие затраты на электродвигатель	-	+	+/-
Относительно невысокие затраты на корпусные и подвижные элементы	+	-	+/-
Плавная регулировка скоростных режимов притирки	+	-	-
Отсутствие дополнительных ограничений для движений притирки	+	+/-	+/-

Таким образом, исходя из данных таблицы 2.3, для разработки притирочного станда была выбрана кинематическая схема №1 (рисунок 2.1(а)). Схема соответствует современным тенденциям станкостроения, в которых наблюдается использование сервоприводов и шаговых двигателей с редукторами вместо традиционных коробок скоростей с асинхронными двигателями.

На основе выбранной кинематической схемы были выпущены несколько принципиальных кинематических схем, которые были запатентованы [69–74] (Приложение Е).

2.1.3 3D-моделирование притирочного оборудования и разработка конструкторской документации

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 меньшего удельного веса проката, высокой

обрабатываемости и наличия унифицированных пазов под крепежные изделия. Конкретный типоразмер профиля выбирался по мере проектирования.

Проектирование велось от выходного звена, определяющего габариты зоны обработки, до корпуса станда с постепенным увеличением жесткости компонентов.

За основу при определении габаритов и типоразмеров, комплектующих был взят спроектированный типовой шаровой шарнир (рисунок 1.4), подлежащий обработке на станде.

На первом этапе был разработан привод собственного вращения, так как он является выходным звеном системы главных движений станда. Он обеспечивает выполнение движения собственного вращения шарового пальца. В состав привода также был предусмотрен датчик силы для обеспечения контроля момента сил трения в шаровом шарнире. Согласно выбранной кинематической схемы для обеспечения работоспособности конструкции станда привод собственного вращения также был снабжен поступательной парой скольжения, которая является основным передаточным элементом конструкции. На направляющей втулке скольжения выгравирована линейная шкала, для визуальной оценки величины перемещения штока и регулировки фактического значения угла нутации при наладке станда на обработку определенного типоразмера шарового шарнира. Скользящая пара является главным приводным валом и крепится к приводу и шарниру посредством жесткой муфты и цанговой оправки соответственно. В качестве привода был выбран шаговый мотор-редуктор 36GP-42H250B08-5, который шарнирно крепится к плите основания привода. Полученная 3D-модель привода собственного вращения представлена на рисунке 2.2.

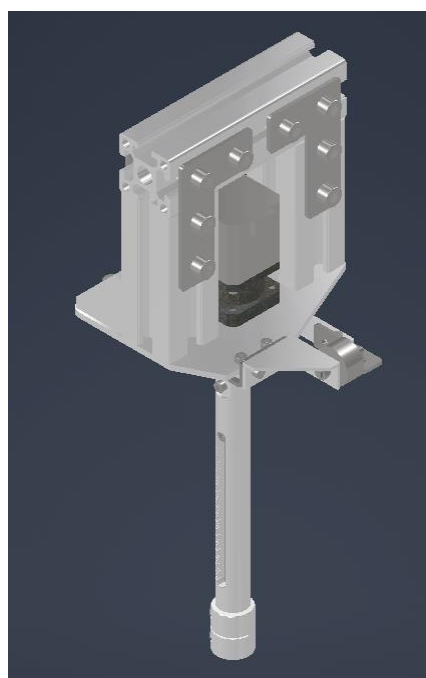


Рисунок 2.2 – Привод собственного вращения

Далее был разработан привод нутации и прецессии (рисунок 2.3). Он обеспечивает выполнение движений нутации и прецессии шарового пальца. Все компоненты привода располагаются на вращающейся консоли. Вращение консоли реализуется приводом прецессии, который состоит из следующих компонентов: шаговый двигатель CS-M22331-L; червячный редуктор RV30-57 20:1; вал прецессии; упорный подшипник RU42UU/CC0P5, плиты редуктора; переходной втулки; крепежа. В верхней части редуктора смонтированы дорожки электрощеточного узла.

Привод нутации обеспечивает перемещение подвижной плиты, на которой шарнирным образом крепится привод собственного вращения. Привод нутации состоит из следующих компонентов: шаговый двигатель CS-M22331-L; гайка ШВП SFYR2020 и ходовой винт ШВП SCR2020FC7; держатель гайки ШВП BSH2020; муфта JM2-25x34-8x10; опоры винта BF12 и BK12; направляющие GHR15 и каретки GHH15CA; плита подвижная; плита торцовая; переходные цилиндрические шарниры и крепеж.

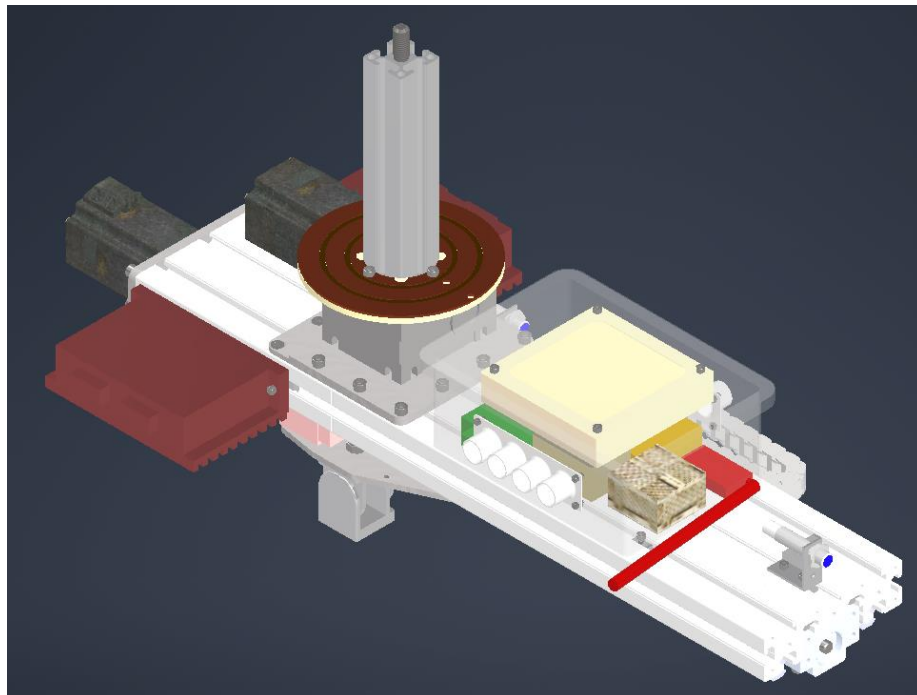


Рисунок 2.3 – Привод нутации и прецессии

Помимо двух приводов на консоли смонтирован блок управления стендом (рисунок 2.4), который подключается к персональному компьютеру (далее – ПК) посредством беспроводного канала связи Wi-Fi. Блок управления состоит из следующих компонентов: корпус; плата управления STM32 Nucleo F401RE; модуль передачи данных 3DR Radio Telemetry; логический преобразователь уровней TXS0108E; модуль АЦП ADS1115; преобразователи напряжения; шины электрические; провода и разъемные соединения; крепеж. В блок управления также смонтирована воздушная система охлаждения.

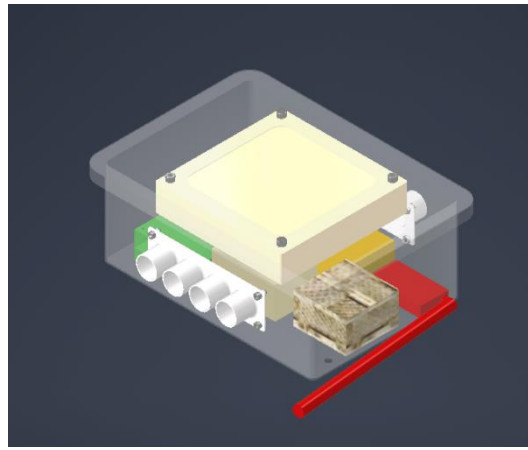


Рисунок 2.4 – Блок управления стендом

Для минимизации габаритов блока управления драйверы шаговых двигателей были вынесены за пределы корпуса блока и смонтированы на консоли привода прецессии и нутации.

Далее была спроектирована рама стенда (рисунок 2.5). Она обеспечивает форму и жесткость конструкции оборудования. Рама состоит из профильного алюминиевого проката и стандартных крепежных деталей. Для обеспечения однозначности собираемости конструкции рамы в профилях были фрезерованы элементы типа шип-паз. В нижней части рамы предусмотрена крестовина, обеспечивающая регулировку положения шарового шарнира на стенде по высоте. Базирование и закрепление шарового шарнира осуществляется в трехкулачковом патроне.

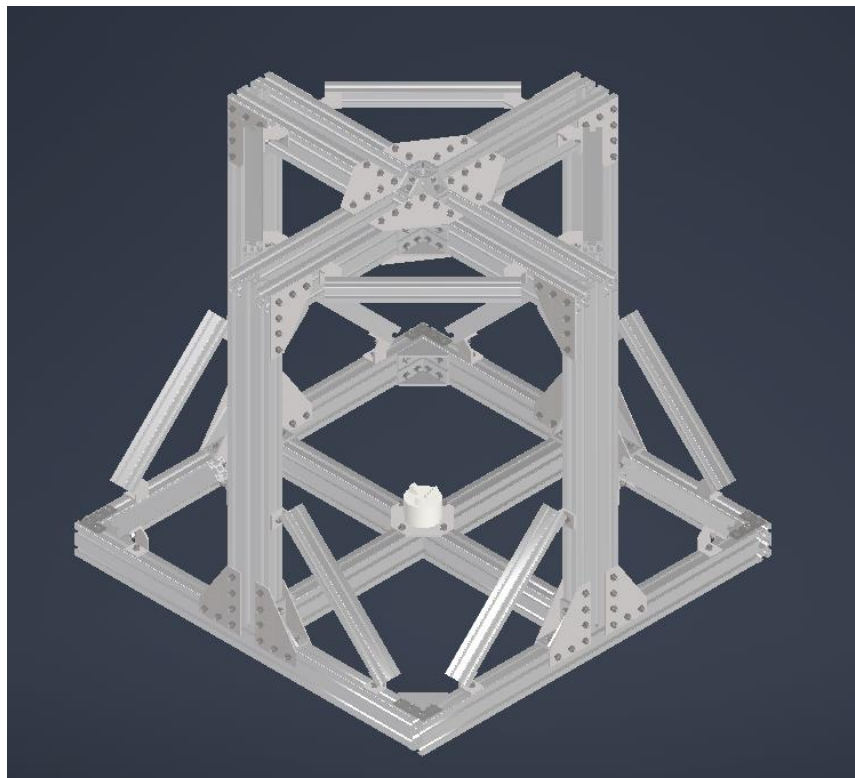


Рисунок 2.5 – Рама стенда

На следующем этапе была разработана система оказания давления (рисунок 2.6). Она обеспечивает рабочее давление на притираемых поверхностях деталей шарового шарнира. Система выполнена в виде классической однорычажной схемы. Такое исполнение обладает относительной простотой конструкции и легкостью регулировки усилия прикладываемого к крышке шарового шарнира путем смены груза. Передаточное отношение у рычага выбрано $1/3$ и по необходимости может быть изменено на $1/2$.

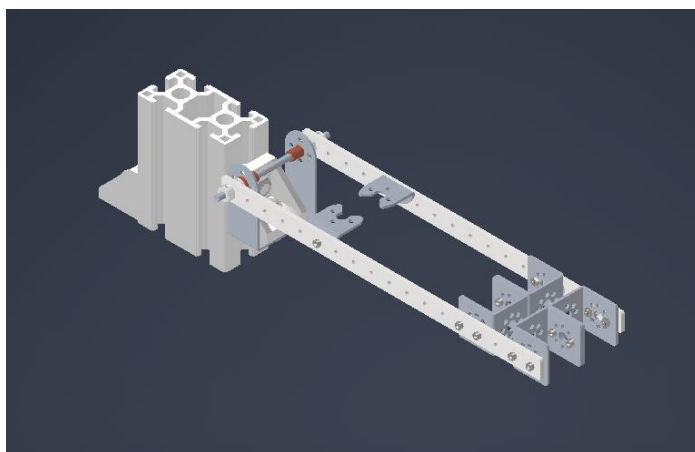


Рисунок 2.6 – Система оказания давления

После разработки всех ключевых систем была разработана основная сборка станда. Полученная 3D-модель представлена на рисунке 2.7. После был произведен анализ собираемости станда и проверка на наличие пересечений компонентов сборки, которые подтвердили возможность изготовления физического образца.

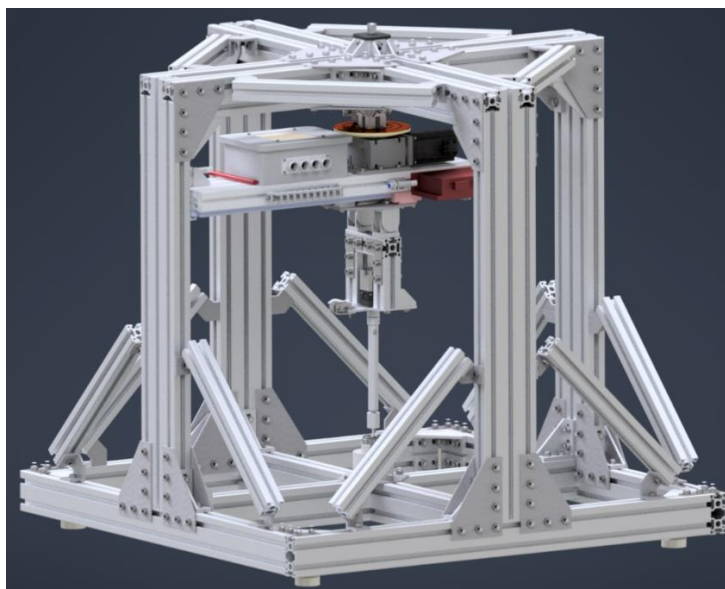


Рисунок 2.7 – Притирочный станд

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

2.1.4 Разработка управляющей программы для притирочного оборудования

Для управления стандом был разработан программный комплекс средств, состоящий из следующих компонентов: ПО пользовательское; ПО передачи информации; ПО контроллера системы управления.

Пользовательское ПО предназначено для взаимодействия пользователя со стандом. В нем пользователь может реализовать следующие функции: отслеживать фактические координаты приводов станда; задавать кинематические параметры, определяющие стратегии обработки; генерировать алгоритм контроля качества изделия по параметрам момента трения в сферическом соединении и ВА сигналу. Также в данном ПО пользователь может задать координаты нуля для приводов системы главных движений. Интерфейс ПО представлен на рисунке 2.8.

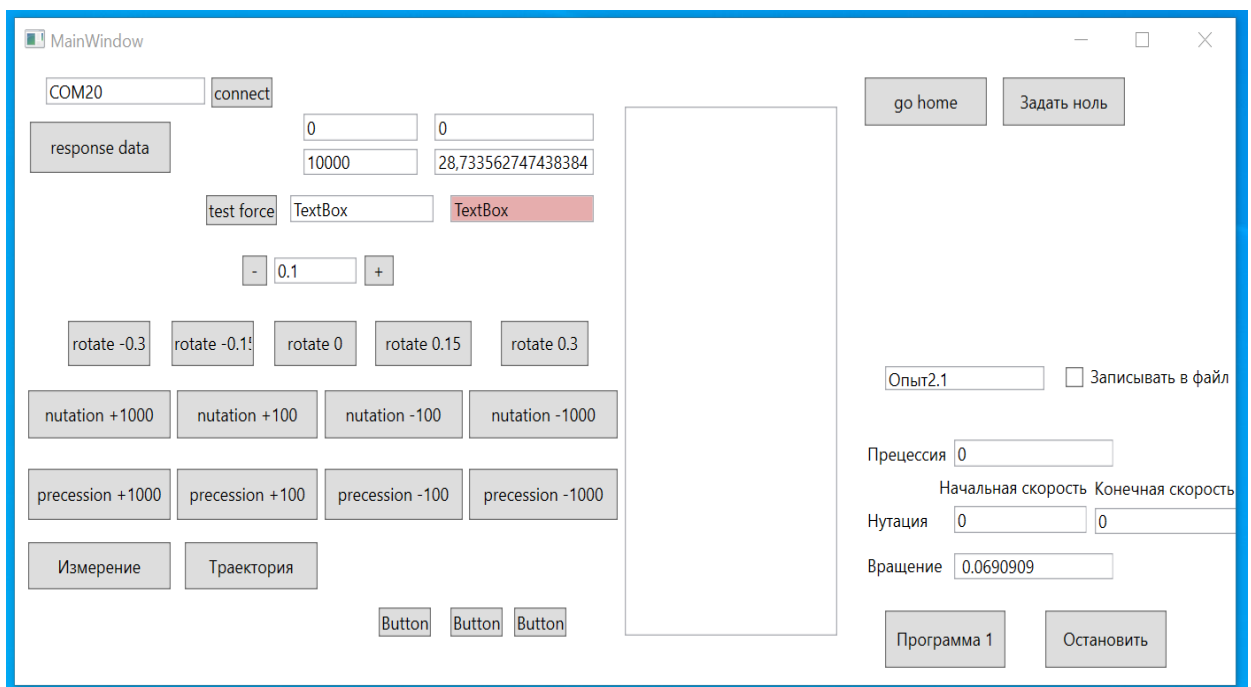


Рисунок 2.8 – Интерфейс пользовательского ПО

ПО для передачи информации предназначено для считывания и отправки управляющих команд с ПК на станд и обратной передачи информации о положении приводов станда и измеренных показателях с датчика силы. Передача информации реализована по беспроводному каналу связи Wi-Fi.

ПО контроллера системы управления предназначено для непосредственного управления рабочими органами станда. В нем настраиваются реализованные передаточные отношения на приводах, допустимые величины ходов подвижных элементов, дискретность шага двигателей, а также взаимодействие электронных компонентов системы управления.

2.1.5 Сборка и наладка притирочного оборудования

Следующим этапом разработки станда было изготовление уникальных деталей. Обработка уникальных деталей осуществлялась на универсальном оборудовании и станках с числовым и программным управлением (далее – ЧПУ). В качестве универсального оборудования использовались бормашина, сверлильный станок, ленточно-шлифовальный станок и циркулярная пила. Универсальное оборудование использовалось для осуществления слесарной обработки в части притупления кромок, нарезания резьбы в отверстиях и отрезки заготовок. В качестве станков с ЧПУ использовались фрезерный 4-х координатный и токарный 3-х координатный станки. На станках с ЧПУ производился основной объем механической обработки деталей станда. Обработка ходового винта ШВП привода нутации была заказана у поставщика компонентов для станков с ЧПУ. Малонагруженные детали системы управления и контроля изготавливались методом 3D-печати на 3D-принтере.

Разработка управляющих программ для станков с ЧПУ производилась в ПО Esprit. Для деталей, подлежащих обработке в два установка, предварительно изготавливались базисные элементы подложки. Пример управляющей программы и обработанной детали представлены на рисунках 2.9 и 2.10 соответственно.

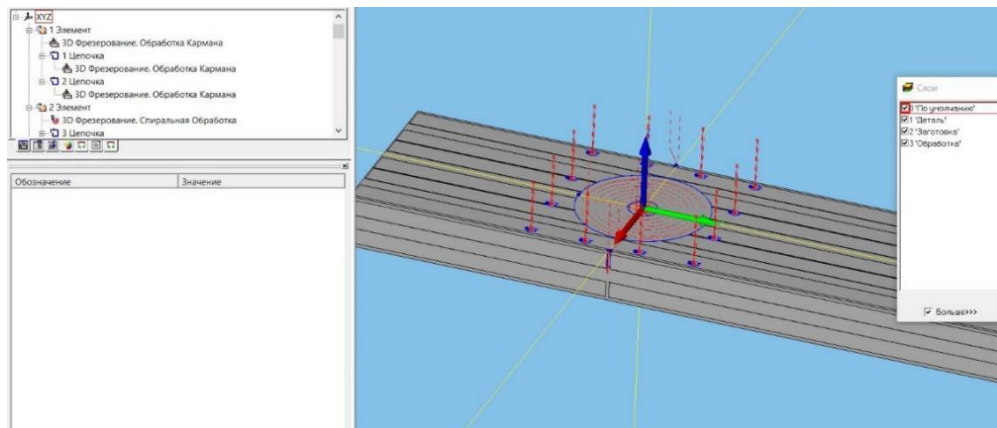


Рисунок 2.9 – Управляющая программа обработки консоли



Рисунок 2.10 – Консоль привода нутации и прецессии

Следующим этапом разработки стенда была сборка узлов стенда. Сборка производилась посредством свинчивания резьбовых поверхностей и прессовых посадок. В качестве инструментов использовались различные ключи, головки, отвёртки и пресс. Перед сборкой на все резьбовые поверхности наносилась смазка ЦИАТИМ-221. Также смазка наносилась на контактные поверхности подвижных соединений механизмов.

В первую очередь был собран привод собственного вращения (рисунок 2.11). При сборке привода была осуществлена приработка пары скольжения посредством притирочной пасты АСМ 7/5 НОМ.



Рисунок 2.11 – Привод собственного вращения

Далее был собран привод нутации и прецессии (рисунок 2.12). Выбор зазора между подвижной плитой и каретками направляющих осуществлялся путем подбора прокладок.



Рисунок 2.12 – Привод нутации и прецессии

Затем была собрана рама стенда (рисунок 2.13) и система оказания давления (рисунок 2.14). Из-за избыточной жесткости конструкции рамы было принято решение не устанавливать кронбалки.



Рисунок 2.13 – Рама станда

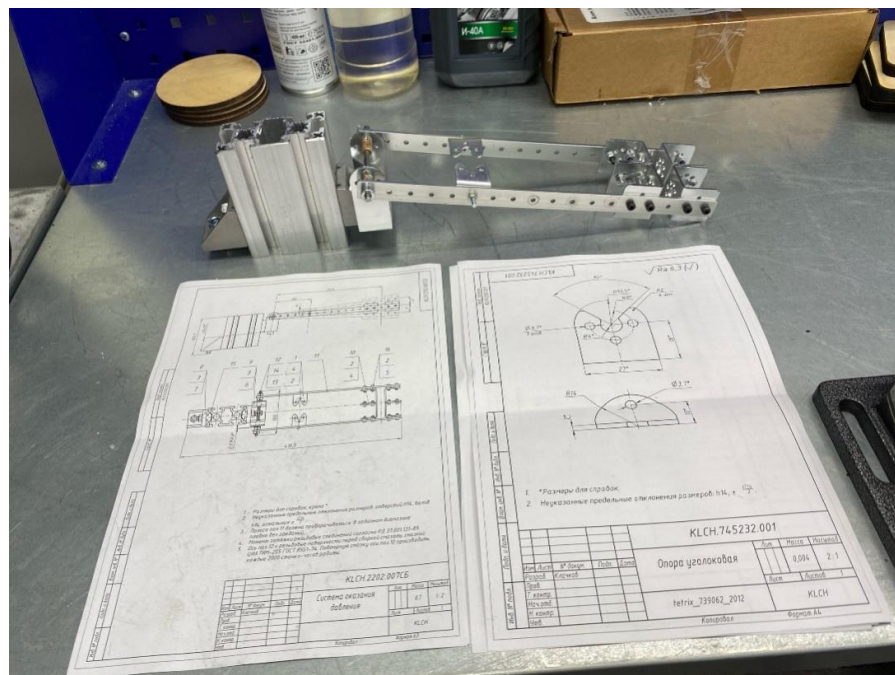


Рисунок 2.14 – Система оказания давления

Сборка блока управления станда производилась на полимерной электроизолирующей подложке. В качестве корпуса блока управления был выбран пластиковый контейнер. Все кабели подсоединяются к корпусу блока управления посредством разъемных клеммных соединений. Полученный блок управления был смонтирован на консоли привода нутации и прецессии (рисунок 2.15). Также на консоли были установлены драйверы шаговых двигателей и концевые датчики.

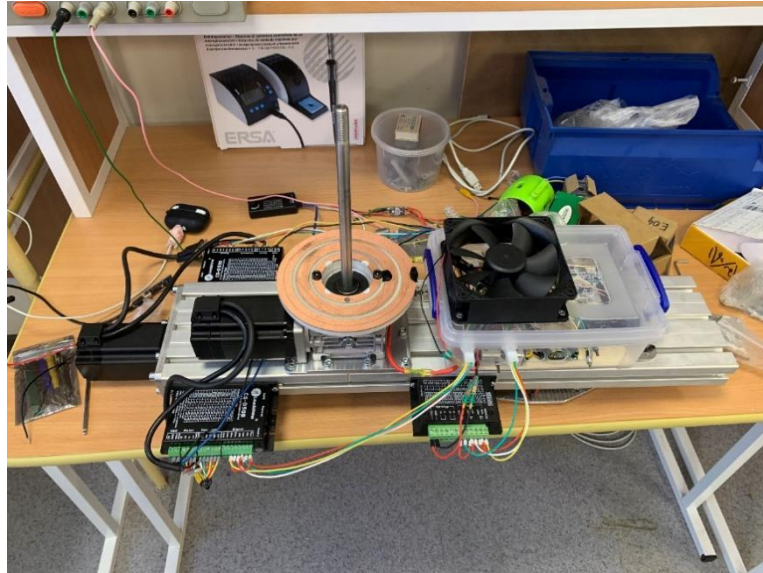


Рисунок 2.15 – Монтаж блока управления

На следующем этапе производилась блочно-агрегатная сборка всех систем стенда. На все подвижные стыки и резьбовые соединения была нанесена смазка ЦИАТИМ-221. 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 представлен на рисунке 2.16 [75].

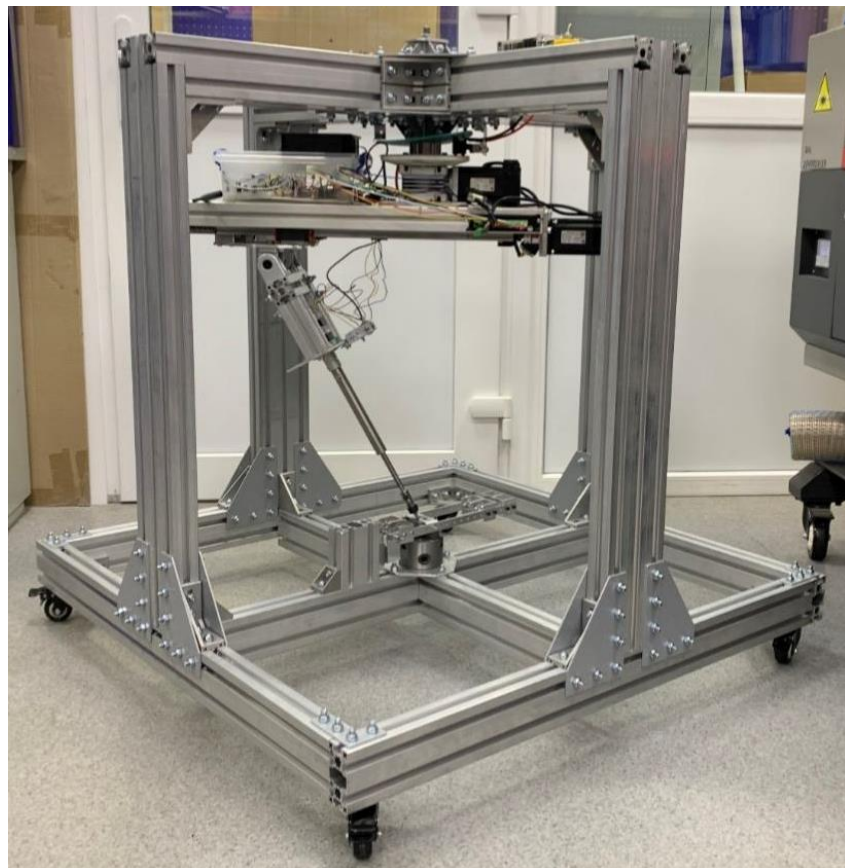


Рисунок 2.16 – Притирочный стенд

После сборки проходил этап наладки рабочих органов станда. Для оценки работоспособности приводов станда было произведено их тестирование в рабочих условиях. После выполнения процедуры тестирования была осуществлена их наладка по параметрам потребляемой электроэнергии и скоростным характеристикам посредством ПО производителя драйверов шаговых двигателей.

Разработанный стенд позволяет производить экспериментальные исследования процесса ВСП с целью 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. Конструктив станда позволяет производить обработку трехкомпонентных шаровых шарниров с максимальным углом наклона шарового пальца до 30 град.

2.2 Стандартные лабораторные 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.

2.2.1 Координатно-измерительная машина

Выполнение высокоточных измерений размеров и геометрических характеристик сферических поверхностей деталей шарнира до и после проведения опытов производилось на КИМ. КИМ предназначены для измерений геометрических размеров деталей сложной формы, отклонения формы и расположения поверхностей элементов деталей в лабораториях автомобильной, судостроительной и авиационной промышленности, приборо- и станкостроения.

В качестве КИМ использовалась машина фирмы Carl Zeiss, модель Prismo Navigator 9/12/7. Три направляющие измерительной машины X,Y,Z образуют декартову базовую СК, в которой расположена трехмерная измерительная головка фирмы Zeiss. Перемещения центра щупа головки измеряются цифровыми измерительными системами высокой разрешающей способности и точности. Конструкция машины портальная, с неподвижным измерительным столом, боковым приводом портала. Пиноль

и направляющие по осям X и Z выполнены из керамики. Технические характеристики машины приведены в таблице 2.4. Общий вид КИМ представлен на рисунке 2.17.

Таблица 2.4 – Характеристики КИМ Prismo Navigator 9/12/7

Параметр	Значение	Единица измерения
Габариты ДхШхВ	2400х1700х3030	мм
Диапазон измерений X	0-900	мм
Диапазон измерений Y	0-1200	мм
Диапазон измерений Z	0-650	мм
Постоянная погрешность измерения	0,9	мкм
Накопительная погрешность измерения	1,0	мкм (на каждые 350 мм)



Рисунок 2.17 – Внешний вид КИМ

Для измерения внутренних сферических поверхностей использовалась измерительная головка VAST gold с одним соосным рубиновым щупом с радиусом наконечника 1,5 мм. Для измерения наружных сферических поверхностей использовалась измерительная головка VAST gold с четырьмя радиальными рубиновыми щупами с радиусом наконечника 1,5 мм.

Управление КИМ производится с ПК посредством специализированного ПО Calipso. В ПО задаются стратегии и характеристики, выполняемых измерений. В результате измерений формируется машинный файл с декартовыми координатами

измеренных точек, который в последствии подгружается в имитационную модель процесса притирки и в приложение по оценке пятна контакта в сферическом соединении.

2.2.2 Виброакустическое оборудование

Измерение ВА параметров, возникающих в сферическом соединении в процессе притирки, производились при помощи измерительной ВА аппаратуры. Перечень оборудования, входящего в состав ВА аппаратуры, и его техническая характеристика, приведен в таблице 2.5. Общий вид виброанализатора представлен на рисунке 2.18.

Таблица 2.5 – Характеристики ВА аппаратуры

Прибор / оборудование	Фирма / Модель	Характеристика
Виброанализатор	Brüel & Kjær / Type 3050-A-060	Частотный диапазон: 0 ... 51,2 кГц. Количество каналов: 6 шт. Линейность частоты: $\pm 0,1$ дБ.
Акселерометр	Brüel & Kjær / Type 4393	Частотный диапазон: 0 ... 16,5 кГц. Резонансная частота: 55 кГц. Количество осей: 1 шт. Погрешность измерения: не более 1,4 %.
Акселерометр	Brüel & Kjær / Type 4321	Частотный диапазон: 0 ... 12 кГц. Резонансная частота: 40 кГц. Количество осей: 3 шт. Погрешность измерения: не более 1,2 %.
Динамометрический молоток	Brüel & Kjær / Type 8202/8200	Диапазон усилий: 100 ... 5000 Н. Линейность: $\pm 1,0\%$. Максимальная перегрузка: 1000 g
Ноутбук с ПО	Hewlett-Packard / 655	ПО для анализа: Pulse v19



Рисунок 2.18 – Внешний вид виброанализатора

Для измерения ВА параметров, возникающих в процессе ВСП деталей шарового шарнира, акселерометр закреплялся на кулачке трехкулачкового патрона посредством цианоакрилатного суперклея.

Для проведения измерений собственной частоты колебаний стэнда акселерометр закреплялся на раме стэнда в нескольких участках. Динамометрическим молотком наносились удары по несущей системе стэнда вблизи места установки акселерометра.

2.2.3 Прочие средства измерения

Измерение шероховатости сферических поверхностей деталей шарового шарнира производилось с использованием профилометра SJ201 от фирмы Mitutoyo. Перед проведением измерений поверхности деталей отчищались и обезжиривались ацетоном. Общий вид профилометра представлен на рисунке 2.19.



Рисунок 2.19 – Внешний вид профилометра

В процессе проведения эксперимента контролировался съём припуска с сферической поверхности шарового пальца между переходами в рамках одного опыта. Измерения выполняли с использованием цифрового микрометра. Общий вид микрометра представлен на рисунке 2.20.

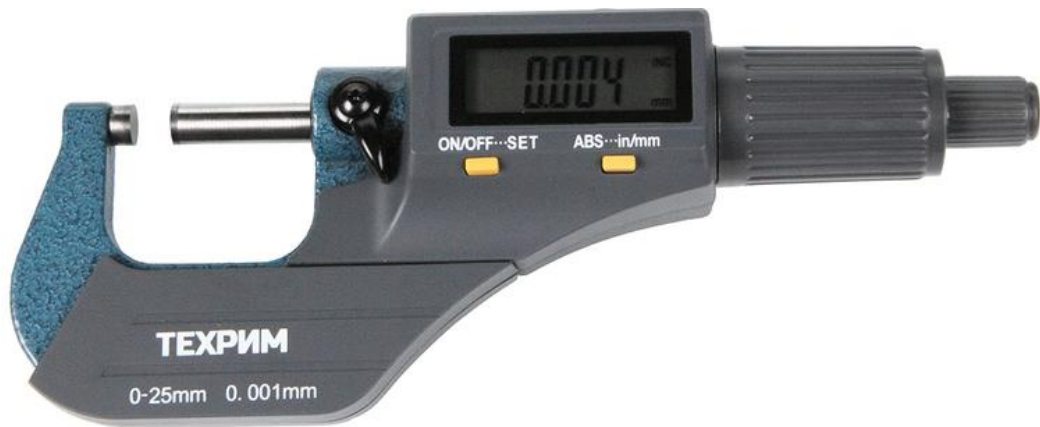


Рисунок 2.20 – Внешний вид микрометра

Измерение времени и координат положения приводов в процессе притирки производились посредством управляющей платы притирочного стенда, посредством пересчета управляющего сигнала, переданного из пользовательского ПО, установленного на ПК. Общий вид управляющей платы представлен на рисунке 2.21.

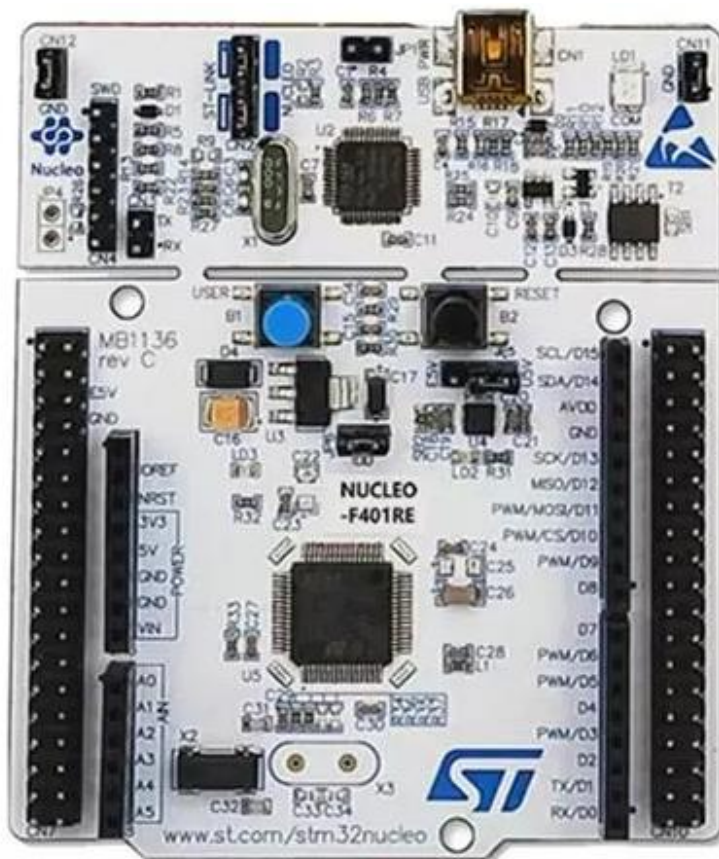


Рисунок 2.21 – Внешний вид управляющей платы

Измерение момента трения в сферическом соединении производился на притирочном стенде путем измерения необходимого усилия для наклона шарового пальца посредством цифрового динамометра. Общий вид динамометра представлен на рисунке 2.22.



Рисунок 2.22 – Внешний вид динамометра

Сводная характеристика описанных выше средств измерения представлена в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Характеристика средств измерения

Наименование средства измерения	Фирма/ Модель	Измеряемый параметр, размерность	Диапазон измерений/цена деления, размерность	Погрешность, размерность
Профилометр	Mitutoyo/ SJ201	Шероховатость, Ra	OX: 0 – 12,5 мм; OZ: 0 – 350 мкм/ 0,01 Ra	±5%
Микрометр	ТЕХРИМ/ МКЦ 25	Отклонение от сферичности наружной поверхности, мкм	0–25 мм/ 1 мкм	±2 мкм
Управляющая плата	STM32/ Nucleo F401RE	Время, с	0–50 суток/ 1 мс	±15 с/мес.
Динамометр	WeiHeng/ Blue Magic	Сила, кгс	0-10 кг/ 5 г	±0,5%

2.3 Выводы по второй главе

1. Для проведения экспериментальной части исследования был разработан, создан и налажен специализированный стенд, позволяющий реализовать процесс ВСП деталей трехкомпонентных шаровых шарниров с максимальным углом наклона шарового пальца до 30 град. Стенд оснащен системой главных движений, состоящей из трех независимых управляемых приводов с обратной связью. Кинематика стенда позволяет обеспечить различные траектории сферического движения с перекрытием необходимой подвижности для притирки типового образца шарового шарнира (раздел 1.3). Управление стендом реализовано через ПК с использованием специализированного ПО посредством беспроводного канала связи. Разработанное оборудование имеет свидетельство о государственной регистрации.

2. Для измерения геометрических характеристик сферических поверхностей деталей шарнира при исследовании характера съема припуска с контактных поверхностей деталей шарового шарнира были определены необходимые измерительные средства технологического оснащения, включающее КИМ, профилометр и микрометр. Подбранное оборудование позволяет с необходимой точностью производить измерение геометрических характеристик деталей.

3. Для проведения измерений ВА сигналов при проведении исследований процессов ВСП в результате притирки был собран комплект аппаратуры, состоящий из виброанализатора, акселерометра, ноутбука с необходимым ПО, позволяющие в достаточном объеме вести исследование параметров АЭ, возникающих в процессе ВСП. Также для сравнительной оценки динамических характеристик на разных стадиях притертости соединения был выбран цифровой динамометр.

3 РАЗРАБОТКА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ

3.1 Выбор инструментария имитационного моделирования

На сегодняшний день в современной литературе можно встретить различные имитационные модели процессов механической и физико-технической обработки деталей [20-55]. Глобально все модели можно разделить на три группы по виду инструментария, используемого для разработки модели. Каждый инструментарий имеет свои достоинства и недостатки. Сравнительная характеристика по каждой группе представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Классификация инструментария имитационного моделирования

Вид инструментария	Примеры	Достоинства	Недостатки
CAE-система	ANSYS, APM-FEM, FlowVision и др.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие большой базы прикладных библиотек. 2. Высокая точность прогнозирования. 3. Высокая универсальность продукта. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Потребность в высокопроизводительных вычислительных ресурсах. 2. Высокая трудоемкость адаптации под задачу ВСП. 3. Высокая стоимость программного обеспечения. 4. Зависимость от прикладных библиотек.
Математические системы	MathCAD, Matlab&, Excel& и др.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Наличие функционала контроля размерностей данных. 2. Возможность передачи данных между двумя системами. 3. Наличие прикладных библиотек. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Сложность передачи данных результатов измерений. 2. Относительно длительное время разработки модели. 3. Сложность графической интерпретации данных моделирования.
Программирование	JavaScript, Python и др.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Гибкость и широта реализации имитационной модели при изменениях предметной области. 2. Независимость от прикладных библиотек и стороннего инструментария. 3. Открытый код программы. 4. Адаптация под любой формат данных результатов практических исследований. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Требуется детальная проработка всех элементов модели. 2. Большие трудозатраты при разработке модели. 3. Низкая производительность расчетов.

Согласно данным в представленной таблице, не было установлено однозначного приоритета в выборе вида инструментария. Поэтому в качестве отсекающих критериев были выбраны зависимость от прикладных библиотек и адаптация под чтение и обработку результатов практических исследований, полученных от используемого оборудования. Таким образом в качестве инструментария имитационного моделирования было выбрано программирование.

В качестве языков программирования были выбраны PHP и JavaScript, так как они являются общедоступными, открытыми и свободно распространяемыми языками.

3.2 Формирование концепции имитационного моделирования

3.2.1 Определение основных факторов процесса притирки

Поскольку основной процесс съема припуска с поверхности имеет физико-механическую природу, в качестве ключевых факторов процесса следует рассматривать динамические и кинематические параметры процесса, а именно: давление и скорость притирки.

Следующими по значимости факторами процесса выступают технологические факторы: тип абразива, размер зерна основной фракции, концентрация абразива, соотношение твердости абразива и детали. Данные факторы в большинстве случаев влияют на интенсивность протекания процесса съема припуска, но не изменяют сам характер процесса.

В результате проведенного анализа степени влияния ключевых факторов на процесс притирки и возможности управления факторами были установлены следующие выводы.

Во-первых, большинство фундаментальных исследователей [2, 3, 9-10] отмечают высокую степень влияния давления на производительность процесса притирки. Объясняется это тем, что есть прямая связь между давлением в зоне притирки и глубиной проникновения абразивного зерна в тело заготовки.

При рассмотрении ВСП необходимо учитывать нюанс о максимально допустимом размере абразивного зерна, ограниченного величиной диаметрального зазора деталей в сферическом соединении, что отмечалось в главе 1. На начальных стадиях притирки отклонения формы сферической поверхности заготовок в несколько раз больше среднеождаемого размера основной фракции абразивных зерен, а силовое замыкание происходит не равномерно по сферической поверхности. Основным фактором

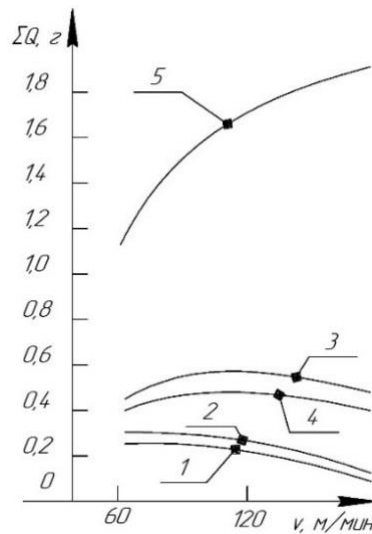
несферичности заготовок выступает технологическая наследственность, которая обусловлена жесткостью и кинематической точностью оборудования, режимными параметрами предварительной обработки сферической поверхности, геометрией инструмента, материалами заготовок и инструмента. Силовое замыкание в зоне контакта происходит от одной заготовки через абразив к другой в местах наибольших выпуклостей на сферической поверхности, которые представлены небольшими локальными участками на поверхности заготовок. При этом происходит явление упрочнения поверхностного слоя, который делится на три зоны. В зоне наружного слоя возможно адсорбирование молекул газа. В зоне приграничного слоя возможны вкрапления мельчайших абразивных частиц. В зоне деформированного слоя наблюдается явление наклепа. Аналогичные процессы перераспределения давления в зоне контакта происходят при плоской притирке [2, 3]. Таким образом, рекомендации для плоской притирки о постепенном понижении давления притирки и размера абразивных зерен при переходе на последующие стадии обработки являются так же приемлемыми.

Управление величиной давления в процессе ВСП традиционно производится по величине нагрузки. Управление ориентацией вектора приложения нагрузки практически не используется из-за ряда технических сложностей. Первая сложность заключается в том, что для реализации контроля распределения давления необходимо использование оборудования с избыточной подвижностью в виде роботизированной руки со встроенными датчиками силы. Вторая сложность заключается в формировании алгоритмов управления таким комплексом, так как помимо задания параметров кинематики процесса необходимо еще управлять прижимной силой, которая будет обеспечиваться роботизированной рукой и системой давления. Таким образом реализация схемы динамического управления распределением давления в зоне притирки является весьма сложной научно-технической задачей, решение которой на текущем этапе развития техники весьма трудоемко.

Также было установлено, что в процессе притирки происходит перераспределение давления в зоне контакта по мере съема припуска с поверхности. Следовательно, схема управления распределением давления является избыточной.

Во-вторых, в современной литературе можно встретить различные оценки влияния скорости на производительность процесса притирки для различных видов абразива (рисунок 3.1). Так некоторые исследователи [2, 3, 7, 9] отмечают отсутствие явного влияния скорости на производительность процесса обработки в условиях плоской притирки на дисковом притирочном станке с использованием суспензий на основе оксида алюминия и оксида хрома. Однако эти обстоятельства скорее являются исключением, так

как большинство исследователей [2, 9, 41-55] отмечают существенное влияние скорости на производительность процесса притирки для большинства режимов обработки.



1 – МОНО; 2 – ЭБ; 3 – КЗ; 4 – В₄С; 5 – АСМ

Рисунок 3.1 – Суммарный съем припуска абразивными суспензиями М5 в зависимости от скорости

Согласно последним исследованиям, модуль скорости притирки имеет линейный характер воздействия на производительность процесса в широком диапазоне варьирования параметра скорости. При достижении некоторого предела начинается резкое снижение производительности. Этот предел зависит от вида абразивного зерна в составе суспензии. Величина предела скорости обусловлена разрушением зерен, вследствие которого происходит потеря абразивной способности суспензии, а также нелинейностью механических характеристик материалов от скорости нагружения.

В процессе ВСП фактор скорости оказывает влияние на производительность процесса как по модулю, так и по направлению. От вида функции скорости зависит траектория движения детали, которая определяет характер движения абразивных зерен и обеспечивает их сменяемость. Таким образом, за счет изменения скорости притирки происходит формирование сферической поверхности и направление шероховатости. От достигнутого в ходе притирки отклонения от сферичности соединения зависит кинематическая точность шаровой пары, жесткость и несущая способность соединения, а направление и величина шероховатости поверхности обеспечивает необходимые условия для формирования масляного клина в сферической паре трения.

При реализации процесса ВСП традиционно используется 3 вращательных движения. Каждое движение обусловлено одной степенью свободы сферической кинематической пары. Следовательно, управление скоростью ВСП сводится к

управлению тремя вращательными движениями. В результате сложения трех векторов скоростей получается результирующий вектор угловой скорости, который коллинеарен мгновенной оси вращения подвижной детали сферического соединения. В зависимости от закона приращения скоростей трех вращательных движений мгновенная ось вращения может покоиться, вращаться или описывать различные траектории.

Также среди различных технологических факторов при прочих равных условиях наибольшее влияние на производительность процесса притирки оказывает вид абразива в составе суспензии. Практика показывает, что наиболее эффективными являются суспензии на основе алмазного абразива.

В последнее время наибольшую популярность приобрели абразивные смеси на основе синтетического алмаза (рисунок 3.2). Основными преимуществами таких смесей стали широкий диапазон обрабатываемых материалов, частичное восстановление режущей способности смеси в процессе притирки за счет раскалывания затупленных зерен и сравнительно невысокая стоимость мелкозернистых суспензий. К недостаткам абразивных смесей на основе алмазов можно отнести ограничения по скоростному режиму притирки и по допустимой температуре в зоне резания.



Рисунок 3.2 – Алмазная паста ACM 7/5 НОМ

При разработке технологической операции притирки производится варьирование основных параметров абразивной смеси в зависимости от стадии операции притирки. Так, на начальной стадии притирки используются крупнозернистые суспензии с низкой концентрацией абразива в смеси. На финишной стадии наоборот – мелкозернистые с высокой концентрацией. Количество стадий зависит от качества поверхности заготовки и готовой детали.

Важным аспектом стабильности процесса притирки на всех стадиях является поддержание режущей способности смеси. Режущая способность смеси снижается не только за счет притупления абразивных зерен, но и за счет увеличения доли стружки в составе смеси. Существует несколько методов поддержания режущей способности абразивной смеси. Первый метод заключается в периодическом добавлении новой смеси в зону притирки. Вторым методом является полная очистка зоны притирки от отработанной смеси и добавление новой. Третьим методом является циркуляционная подача абразивной смеси с добавлением этапа фильтрации.

Подводя итог вышеизложенному следует отметить, что в качестве ключевых факторов процесса притирки, подлежащих учету при разработке имитационной модели, были выбраны следующие: скорость притирки, давление в рабочей зоне и режущая способность абразивной.

Фактор режущей способности представляет собой комплексный параметр, зависящий по большей части от характеристики абразивной смеси. В следующих разделах были дополнительно подробно проанализированы факторы давления и скорости притирки, так как данные факторы имеют различные способы описания.

3.2.2 Кинематика процесса взаимной сферической притирки

Кинематические параметры процесса ВСП являются основными управляемыми факторами, обеспечивающими качество сферического соединения. Поэтому управление кинематическими параметрами процесса притирки является приоритетной задачей.

Для разработки модели управления движением притирки необходимо было произвести комплексный анализ кинематики сферического движения. По результатам анализа следовало определить наиболее простую модель описания движений для возможности динамического управления траекторией движения притираемой детали в процессе притирки.

3.2.2.1 Особенности сферического движения

Под сферическим движением принято понимать движение абсолютно твёрдого тела, при котором оно имеет одну неподвижную точку [76]. При таком движении из 6 степеней свободы тело лишено 3 поступательных и имеет 3 вращательных движения.

Существует несколько основных способов описания сферического движения. Ниже рассмотрены некоторые способы, которые получили наибольшее распространение.

Первый способ был представлен Л. Эйлером [77] и заключается в описании движения тела посредством трех угловых перемещений: собственного вращения, прецессии и нутации (рисунок 3.3). Для определения движения тела используется 2 декартовы системы координат (далее – СК): подвижная СК $OZ_1X_1Y_1$, связанная с вращающимся телом; и неподвижная СК $OZXY$, относительно которой движется тело. Движение нутации θ определяется углом вращения между осью OZ_1 подвижной СК и осью OZ неподвижной СК. Движение прецессии ψ определяется углом вращения между линией узлов OK и осью OX неподвижной СК. Линия узлов образуется в результате пересечения плоскости X_1Y_1 подвижной СК с плоскостью XY неподвижной СК. Движение собственного вращения ϕ определяется углом вращения между линией узлов OK и осью OX_1 подвижной СК.

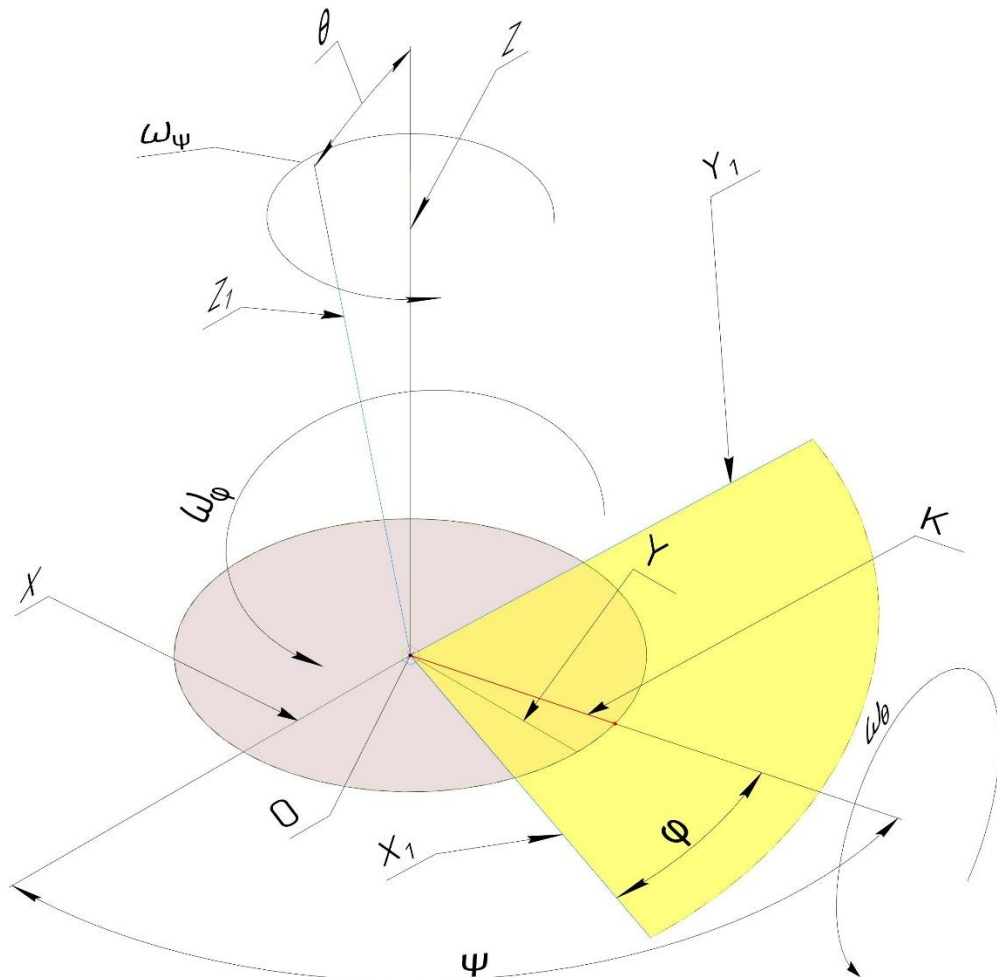


Рисунок 3.3 – Система углов Эйлера

Второй способ был предложен А.Н. Крыловым [78]. Такая система предназначена для описания качки судна во время волнения на воде и принята в качестве основной в

судоходстве (рисунок 3.4). Для описания качки судна используется две СК: глобальная СК, нормально сориентированная по курсу движения судна, и СК судна. Первое движение крена γ определяется углом наклона корабля относительно его продольной оси. Второе движение дифферента θ определяется углом наклона корабля с кормы на нос. Третье движение рыскания ψ определяется углом смещения продольной оси с курса следования судна. В отличие от способа Л. Эйлера в способе А.Н. Крылова истинное положение горизонтальной продольной оси задается углами рыскания и дифферента. Положение вертикальной оси определяется посредством углов рыскания и крена. Положение горизонтальной перпендикулярной оси получается аналогичным способом по углам крена и дифферента, либо выражается как ортогональный вектор к двум предыдущим осям.

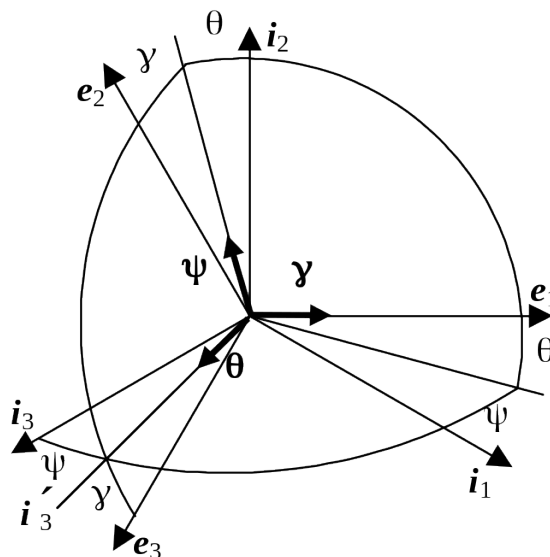


Рисунок 3.4 – Система углов Крылова

Третий способ, аналогичный способу А.Н. Крылова, предназначен для описания сферического движения воздушного судна [79]. Отличие от способа Крылова заключается в том, что угол дифферента γ называется углом тангажа γ , угол рыскания ψ – углом скольжения ψ . Также отличием является то, что корабельная система описания движения строится на левосторонней Декартовой СК, а авиационная на правосторонней. Для определения движение воздушного судна и его положения выполняется следующая процедура. Сначала СК воздушного судна совмещают с глобальной СК, нормально сориентированной по курсу полета. Затем последовательно рассчитываются необходимые повороты на угол скольжения, затем на угол тангажа и в конце на угол крена, которые требуется выполнить, чтобы воздушное судно приняло конечное положение. При этом каждый последующий поворот выполняют относительно нового положения судна.

После последовательного совершения всех поворотов тело принимает конечное положение (рисунок 3.5).

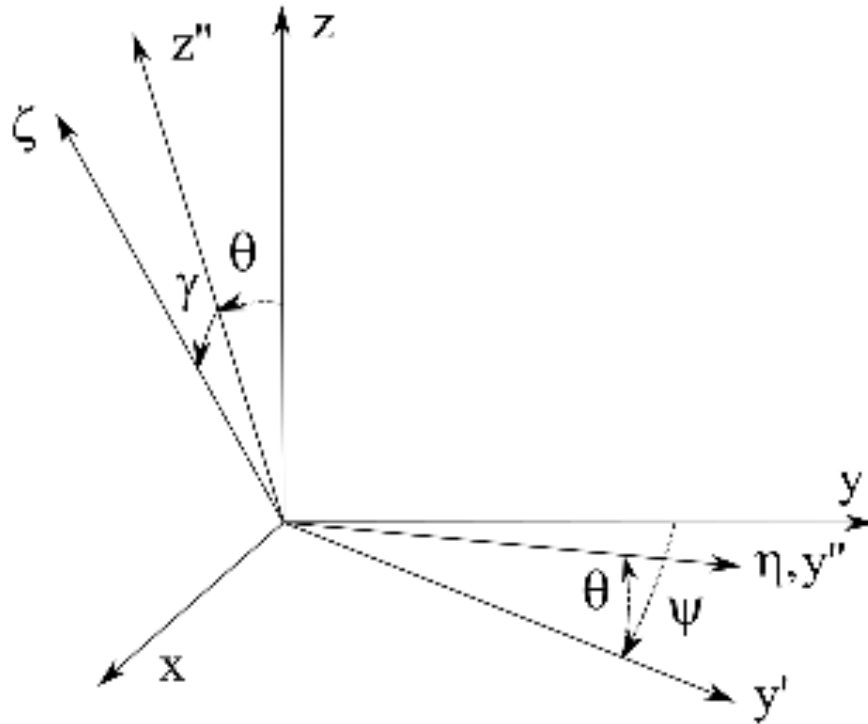


Рисунок 3.5 – Авиационная система углов

Для дальнейшего описания кинематики был выбран способ Л. Эйлера, так как он является наиболее распространённым и достаточно просто адаптируется под задачи компьютерного моделирования. При моделировании кинематики важно сохранять порядок расчёта поворотов, поскольку сферическое движение является не коммутативным. В противном случае возникают разные положения тела в пространстве.

Для описания сферического движения на практике используются следующие СК: декартова, географическая и сферическая.

Декартова СК традиционно используется для описания положения тела в пространстве при сферическом движении в силу своей наглядности представления. Также использование Декартовой СК позволяет однозначно определить положение тела без введения дополнительных параметров.

Географическая СК используется для представления положения точки на поверхности сферы. Практическое представление географической СК реализовано в виде развертки сферы на плоскость, которую предложил Меркатор [80]. Горизонтальная ось имеет линейную шкалу, а вертикальная – комбинированную логарифмическую. При использовании географической СК в задаче сферического движения для полного представления ориентации тела необходимо добавить угол собственного вращения тела.

Сферическая СК при сферическом движении позволяет задать лишь направление ориентации тела. В прямом виде ее невозможно использовать в силу отсутствия координаты угла собственного вращения тела.

Для задачи кинематики ВСП была выбрана видоизменная сферическая СК, в которой добавлена координата угла собственного вращения тела [81]. При этом координата длины вектора R не учитывается. Использование видоизменной сферической СК позволяет максимально упростить математическое описание кинематики процесса ВСП, поскольку ее координаты напрямую выражают допустимые виды движения тела.

3.2.2.2 Анализ кинематики разработанного стенда

Разработанный стенд имеет независимую кинематику трех видов сферического движения по способу описания Л. Эйлера. Подтверждением данного тезиса является логическое умозаключение, исходящее из определений видов сферического движения, изложенного Л. Эйлером.

Как было отмечено ранее движением нутации является вращение твердого тела вокруг линии узлов ОК. Полученный в результате такого вращения угол θ между осью OZ_1 подвижной СК и осью OZ неподвижной СК является углом нутации. В предложенном стенде движение нутации обеспечивается приводом нутации, который за счет перемещения подвижной каретки меняет угол наклона шарового пальца относительно вертикали (рисунок 3.6).

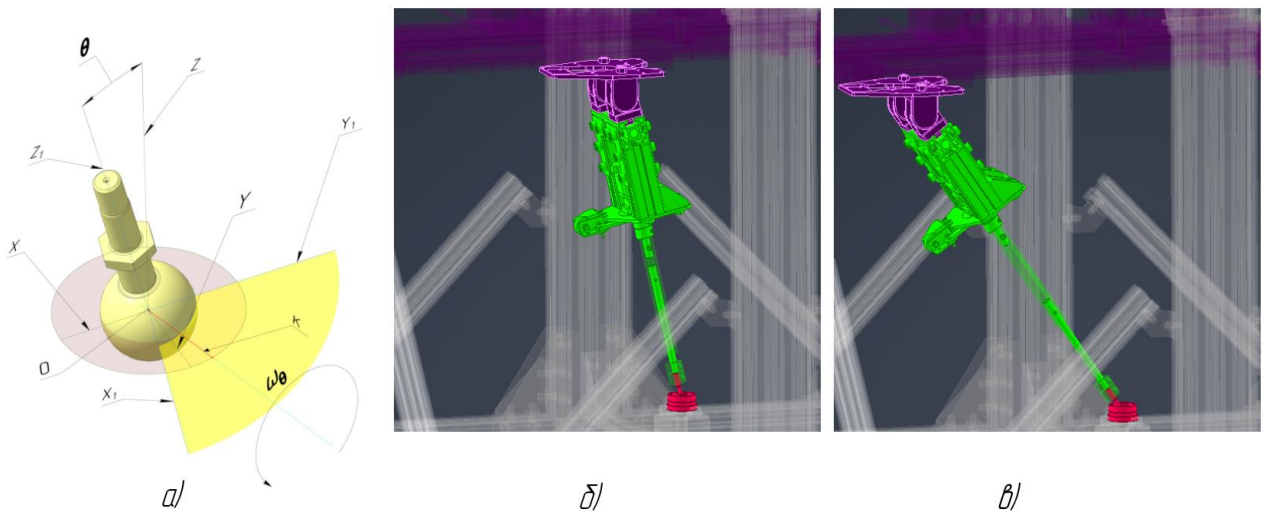


Рисунок 3.6 – Движение нутации: а – теоретическая схема; практическая реализация б – начальное положение, в – конечное положение

Движением прецессии является вращение твердого тела вокруг оси OZ . Полученный в результате такого вращения угол ψ между осью OX неподвижной СК и

линией узлов ОК является углом прецессии. В разработанном стенде движение прецессии обеспечивается приводом прецессии, который передает вращение на червячный редуктор, меняющий угол направления консоли в горизонтальной плоскости (рисунок 3.7).

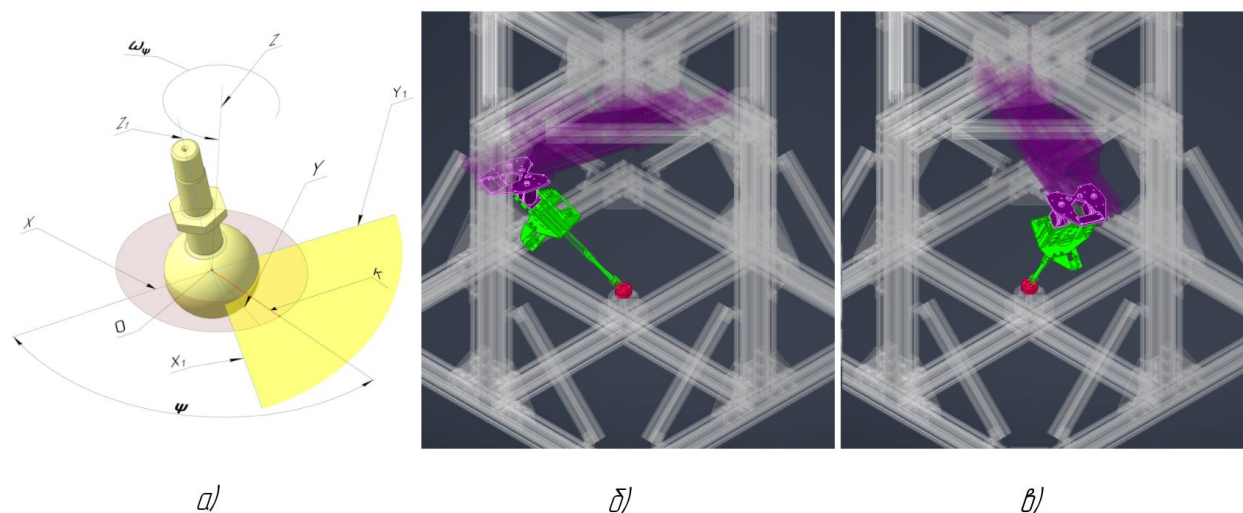


Рисунок 3.7 – Движение прецессии: а – теоретическая схема; практическая реализация б – начальное положение, в – конечное положение

Движением собственного вращения является вращение твердого тела вокруг оси OZ_1 . Полученный в результате такого вращения угол ϕ между линией узлов ОК и осью OX_1 подвижной СК является углом собственного вращения подвижного тела. В созданном стенде движение собственного вращения обеспечивается приводом собственного вращения, который посредством планетарного соосного редуктора напрямую передает вращение на шаровой палец, заставляя его вращаться вокруг собственной оси вращения (рисунок 3.8).

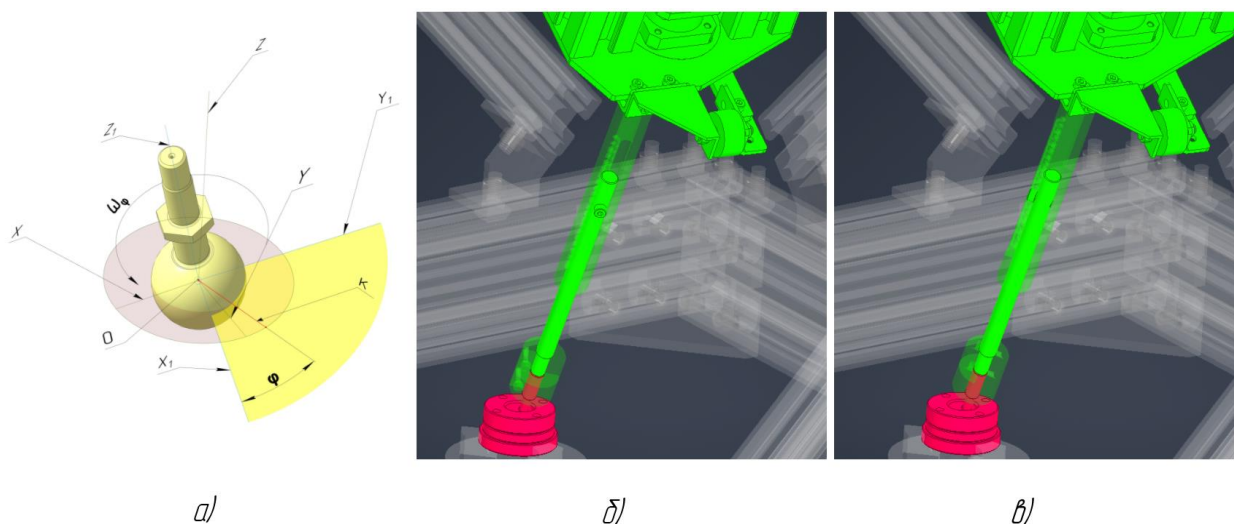


Рисунок 3.8 – Движение собственного вращения: а – теоретическая схема; практическая реализация б – начальное положение, в – конечное положение

Таким образом благодаря реализации независимой кинематики трех видов сферического движения на стенде для перемещения шарового пальца из произвольного

одного начального положения в конечное требуется лишь повернуть каждый привод на соответствующий ему угол приращения с учетом редукции. Для приводов прецессии и собственного вращения коэффициент редукции постоянен и равен передаточному отношению соответствующих редукторов, а для привода нутации он выражен функциональной зависимостью как арктангенс отношения величины перемещения каретки на величину вертикальной составляющей расстояния от центра шарового шарнира до цилиндрического шарнира, смонтированного на каретке.

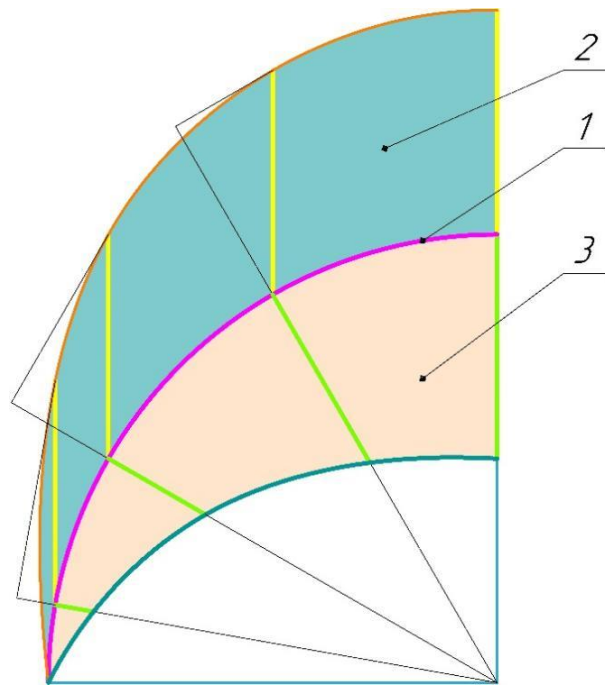
3.2.3 Распределения давления в зоне притирки

Распределение давления в сферическом соединении является не тривиальной задачей. В отличие от классической задачи Герца [82], в контакте участвует практически вся поверхность сферы. На первом этапе анализа были рассмотрены существующие подходы решения контактной задачи.

3.2.3.1 Выбор модели распределения давления в сферическом соединении

В литературе можно найти два вида аналитических моделей описания распределения давления в сферическом соединении.

Первая модель строится на предположении [83, 84], что давление распределяется по закону косинуса угла между вектором приложения нагрузки и вектором нормали поверхности. Вертикальная нагрузка, приложенная к поверхности сферы, равномерно распределяется по площади проекции сферы на плоскость, перпендикулярную линии действия силы. Схема нагружения симметрична относительно вертикальной и горизонтальной оси в сечении, поэтому для наглядности визуализации распределения давления используется одна четверть схемы (рисунок 3.9). Максимальное давление возникает на участке сферической поверхности, нормально расположенном относительно линии действия вертикальной силы. Угол между вертикальной силой и нормалью к поверхности увеличивается по мере приближения к экваториальной части, что приводит к уменьшению нормальной силы на поверхности. Минимальное давление возникает на участке сферической поверхности, расположенном параллельно линии действия вертикальной силы. Участок представлен в виде кольца с бесконечно малой шириной. Величина давления на указанном участке стремится к нулю.



1 – сферическая поверхность; 2 – эпюра распределенной вертикальной силы; 3 – эпюра нормальной силы

Рисунок 3.9 – Схема распределения давления в зоне контакта сфер

Рассмотренную модель сложно адаптировать под задачу ВСП, поскольку она не учитывает перераспределение давления, возникающее под действием съема припуска с сферических поверхностей. Также в данной модели весьма затруднительно выполнить учет реальной формы контактных сферических поверхностей деталей.

Вторая модель строится на предположении, что давление в сферическом соединении распределяется равномерно по поверхности контакта [85-87]. При этом степень равномерности распределения давления зависит от соотношения радиусов сферических поверхностей. С ростом величины отношения радиусов происходит перераспределение давления. Определение величины перераспределения производится по расчетной формуле, коэффициенты для которой подбираются по графикам. При идентичных значения радиусов внутренней и наружной сферической поверхности расчет давления идентичен расчету напряжений смятия в зоне плоского контакта.

Такая модель лучше подходит для описания распределения давления в условиях притирки, так как она учитывает наличие неоднородности пятна контакта. Однако представленная модель имеет большую погрешность при расчете из-за особенностей определения значений эмпирических коэффициентов.

Существенным недостатком рассмотренных выше моделей является невозможность учета локальных отклонений от сферичности, которые оказывают существенное влияние на перераспределение давления в соединении.

Чаще всего в современных исследованиях для решения подобных задач используются численные имитационные модели распределения давления [50-55]. Существенное преимущество таких моделей заключается в том, что их точность прогнозирования напрямую зависит от точности задания исходных параметров и количества итераций поиска решений систем уравнений.

Классическим примером такого моделирования является CAE-модель контактного взаимодействия твердых тел, основанная на МКЭ. Такого класса модели традиционно разрабатываются в специализированных CAE программах, например, ANSYS, FlowVision и т. п. Также большинство современных CAD имеют в своем составе специализированные модули, позволяющие строить упрощенные аналогичные модели.

CAE-модели являются весьма точными, однако в условиях динамического расчета распределения контактного давления эти модели избыточны, так как в них параллельно производится расчет внутренних напряжений [88]. Поэтому в процессе ВСП, такую модель использовать нерационально с точки зрения производительности расчетов.

Упрощенной версией CAE-моделей являются численные модели упругого основания. В таких моделях производится расчет перераспределения давления, а величина деформаций рассчитывается только по поверхности контакта. При этом нагрузка задается строго по нормали к поверхности контакта без учета внутренних трений и сдвигов. Такой подход позволяет существенно повысить производительность расчета, а для среды моделирования может подойти любой язык программирования или специализированное программное обеспечение (далее – ПО), например, Matlab&, Mathcad, Excel& и др.

Классическим примером имитационной модели упругого основания является модель Винклера [80]. Автор предложил контактную поверхность одного тела представить в виде поля точек абсолютно твердого тела, а ответную контактную поверхность второго тела – в виде совокупности упругих стержневых элементов равной длины. При этом отклонения формы поверхности тел на поверхности контакта попарно суммируются и учитываются в рельефе контактной поверхности первого тела. Модель Винклера описывается уравнением (1.9). Представленная модель обладает высокой расчётной производительностью. Важным требованием при построении такой модели является равномерность распределения упругих стержневых элементов по зоне контакта.

В.З. Власов модернизировал модель Венклера, добавив в нее контактную поверхность в виде упругой мембраны, которая выступает границей раздела между упругими стержневыми элементами и твердым телом [90]. Благодаря этому удается учесть влияние упругих элементов, выходящих за границы зоны контакта. Г.Я. Попов обобщил

модель В.З. Власова, учтя вариант множественного добавления мембран в качестве промежуточных слоев [91].

Еще одной упрощенной версией САЕ-моделей являются численные модели линейно-деформируемого полупространства и модель упругопластичной среды [92]. Такие модели учитывают взаимное влияние граничащих элементов и представлены в виде системы уравнений, состоящей из статических, геометрических и физических уравнений теории упругости. В отличие от моделей упругого основания в данных моделях деформация поверхности происходит еще и за границей зоны контакта. Также такие модели имеют практическое подтверждение: наличие линии прогиба для существенных деформаций, порядок которых совпадает с размером контактных зон. Расчет деформаций элементов сечения производится по следующим уравнениям равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.1-3.2)$$

Среди рассмотренных выше моделей наибольшую популярность для описания распределения давления в условиях притирки приобрела модель Винклера. Существенным ее преимуществом является относительно высокая скорость расчетов. В силу малости фактических значений деформаций контактных поверхностей при притирке можно пренебречь малыми значениями давлений вблизи границ контакта, следовательно, модель Винклера весьма рациональна для таких условий. При необходимости модель легко преобразуется к нелинейному виду путем замены линейного закона деформации тела через степенную зависимость, например, посредством степенного закона Бюльфингера [93-95]. Однако в большинстве практических задач это не требуется.

В ходе проработки задачи распределения давления в зоне притирки был также рассмотрен метод гидравлического взаимодействия. Такой метод основывается на взаимодействии жидкостей металлической плотности друг с другом. При этом допускаются взаимное проникновение жидкостей, а величина объема проникновения является эквивалентом силы контактного взаимодействия.

Для метода гидравлического взаимодействия применимо несколько подходов обеспечения силового баланса в сферическом соединении. Первый подход заключается в том, что локальные силы контактного взаимодействия воспринимаются диаметрально противоположными участками сферической поверхности. При этом доля распределения нагрузки на локальном участке диаметрально противоположной поверхности определяется через угол между нормальными локальных участков и общей долей от объема

проникновения диаметрально противоположной поверхности. В случае наличия зазоров, давление распределяется обратно пропорционально величинам зазоров.

Второй подход заключается в обеспечении баланса статических моментов объемов проникновения, который зависит от взаимного положения деталей шарнира. При этом в распределении давления участвуют только участки с взаимным проникновением поверхностей. Такой подход обязывает рассматривать контактирующие детали парами крышка - шаровой палец и подпятник - шаровой палец.

Из рассмотренных подходов для задачи распределения давления в сферическом соединении лучше всего подходят модели Винклера и гидравлического взаимодействия. Эти модели позволяют производить достаточно точный расчет в силу малости деформаций контактной поверхности относительно линейных размеров обрабатываемых деталей. Однако для использования модели Винклера необходимо ее модернизировать, добавив предварительную операцию развертывания контактных сферических поверхностей на плоскость. При этом имеющиеся зазоры в сферическом соединении необходимо учесть как отклонения от плоскостности твердого тела.

Модель гидравлического взаимодействия не требует специальных доработок. Также гидравлическая модель оперирует величинами объемов, которые при необходимости можно преобразовать в стружку, являющуюся фактическим продуктом съема припуска в ходе притирки.

Таким образом, для описания характера распределения давления в зоне контакта деталей при условиях ВСП была выбрана модель гидравлического взаимодействия тел.

3.2.3.2 Влияние отклонения формы поверхности в зоне контакта на распределение давления

Характер распределения отклонения от сферичности по контактной поверхности детали и ее пространственная ориентация являются определяющими факторами в распределении давления притирки, так как распределение давления происходит по зоне контакта деталей. Появление локальных отклонений формы сферической поверхности изменяет площадь поверхности контакта и, следовательно, влияет на характер распределения давления [53].

В общем случае возможны два вида основных отклонений формы сферической поверхности: выступ и впадина. Для начала следует отметить, что рассматриваемые локальные отклонения формы могут находиться как на выпуклой, так и на вогнутой

сферической поверхности. Влияние однотипных отклонений на характер распределения давления идентично и не зависит от вида поверхности.

Первым типом отклонения является локальный выступ. Такое отклонение образует гиперконтакт. В результате вся внешняя нагрузка, приложенная к соединению, распределяется между локальной областью выступа и диаметрально противоположной областью поверхности контакта. В рассматриваемом шаровом шарнире также имеет значение место расположения отклонения. Так, при нахождении дефекта вдоль оси изделия величина передаваемого усилия в области выступа равна нагрузке, прикладываемой к соединению. При смещении положения выступа к экваториальной зоне сначала происходит снижение давления из-за образования дополнительной зоны контакта на той же детали в противоположном меридианном сечении. Минимальное значение усилия достигается при положении отклонения на широте, примерно равной 45 градусов. Незначительное увеличение угла происходит за счет влияния силы трения в соединении. При дальнейшем смещении положения выступа происходит существенное увеличение усилия за счет образования эффекта клина.

Вторым типом отклонения является локальная впадина. Такое отклонение приводит к уменьшению площади контакта и перераспределению давления по условию силового баланса вдоль границы локального отклонения с поверхностью контакта. Аналогично первому типу отклонения локальная впадина также изменяет характер своего влияния в зависимости от широты расположения. Отличие заключается в том, что наличие впадины не влияет на образование дополнительного контакта на противоположной стороне сферической поверхности ответной детали.

Остальные отклонения являются частными случаями рассмотренных выше. В рассматриваемом шарнире в деталях «Крышка» и «Подпятник» имеются отверстия, которые можно рассматривать как круговые локальные впадины. Помимо впадин все детали имеют отклонение от сферичности, обусловленные фактором технологической наследственности. Так, на детали «Шаровой палец» минимальный диаметр сферической поверхности располагается в экваториальной зоне, а максимальный – у полюсов. Для деталей крышка и подпятник ситуация противоположная. Объясняется это возрастанием силы резания при приближении резца к оси вращения из-за снижения скорости резания.

Таким образом, присутствующие локальные отклонения формы и конструктивные элементы напрямую влияют на характер распределения давления в сферическом соединении. Количественную оценку распределения давления по поверхности контакта производится средствами CAE-моделирования. Аналитическое решение затруднено в

силу сложности выражения уравнений силового баланса и формы отклонений на поверхности в явном виде, поэтому на практике не применяется.

3.2.4 Физическая сущность процесса взаимной сферической притирки

Физическая сущность процесса притирки сводится к постепенному удалению припуска за счет механизма абразивного съема припуска с контактных поверхностей [2, 9]. Повышенный съем припуска возникает на участках поверхности, где значения факторов скорости и давления притирки принимают наибольшее совокупное значение.

Таким образом, при прочих равных условиях для соосного положения шарового пальца с крышкой и подпятником при движении собственного вращения повышенный съем припуска будет возникать в кольцевых областях, расположенных на широте 45 град. (рисунок 3.10). В областях, расположенных на экваторе и полюсах, съем припуска будет приближен к нулю, в силу нулевых перекрестных значений факторов. На последующих стадиях произойдет перераспределение давления, и, как следствие, смещение зоны в направлении области максимального давления.

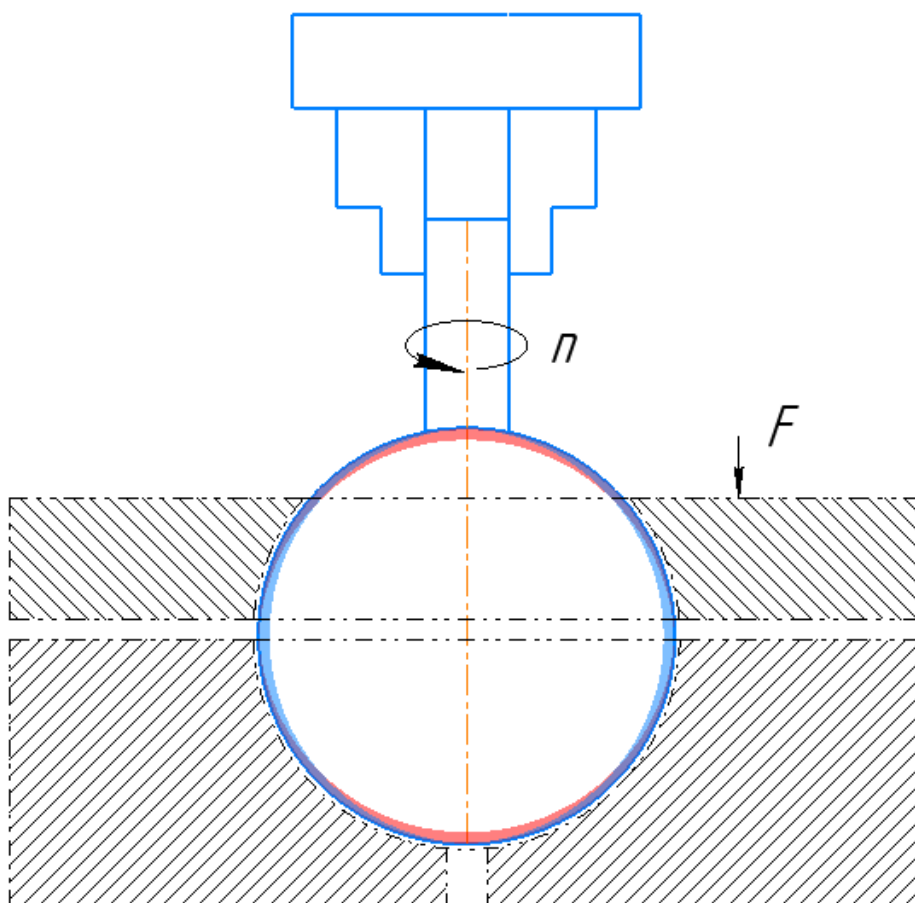


Рисунок 3.10 – Зоны повышенного съема припуска

Также важным обстоятельством процесса съема припуска является наличие абразивной суспензии в области потенциальной притирки. На распределение абразивной смеси влияют различные факторы, в частности: направление вектора скорости, величина зазора, сила инерции и др.

3.3 Алгоритм имитационного моделирования процесса взаимной сферической притирки

В основу разработанной имитационной модели для описания съема припуска с поверхности в процессе притирки было заложено уравнение Престона [20]. Предсказательная способность уравнения Престона возрастает при представлении изнашиваемой поверхности в виде множества элементарных сегментов, площадь которых во много раз меньше, чем у исходной поверхности. Такой подход позволяет учесть локальный съем припуска на каждом участке притираемой поверхности и, как следствие, более точно спрогнозировать ожидаемый рельеф.

В разработанной имитационной модели используется алгоритм, состоящий из последовательного выполнения следующих этапов автоматического характера:

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 сферических поверхностей деталей шарнира по модифицированному уравнению Престона.

3.3.1 Генерация сферических поверхностей

Этап генерации сферических поверхностей деталей шарнира заключается в моделировании сферических поверхностей в виде набора элементарных сферических сегментов малой площади. Для проведения качественного и количественного анализа необходимо, чтобы генерирующиеся сегменты сферической поверхности имели одинаковую площадь.

В современной литературе такую задачу решают посредством равномерного распределения точек по сферической поверхности. Можно выделить 2 основных метода генерации равномерно распределенных точек по сферической поверхности.

Первый метод заключается в генерации точек посредством формул, использующих функцию рандомизации [96]. Формулы имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \theta &= \arccos(2 \cdot \text{Random} - 1) \\ \psi &= 2\pi \cdot \text{Random} \end{aligned} \right\} \quad (3.3-3.4)$$

где *Random* – случайное число принимающее значение от 0 до 1.

Второй метод заключается в генерации равномерно распределенных точек внутри объема сферы [96]. Затем полученные точки проецируются на сферическую поверхность по кратчайшему расстоянию до нее.

В ходе выполнения геометрического анализа сферической поверхности был установлен альтернативный метод равномерного распределения точек по сферической поверхности, который заключается в нижеописанном алгоритме. Точки строятся в местах пересечения меридиан и широт. Меридианы образуются путем пересечения поверхности сферы плоскостями, проходящими вдоль оси вращения детали, с равным угловым шагом между меридианами. Широты образуются путем пересечения поверхности сферы плоскостями, перпендикулярными к оси вращения детали, с равным линейным шагом по высоте вдоль оси вращения. При таком методе распределения точки являются вершинами сферических сегментов, площади которых, согласно формуле площади поверхности сегмента сферы, равны [97]. Площадь элементарного сферического сегмента рассчитывается по формуле:

$$S_{cer} = \delta\varphi \cdot R \cdot \delta h, \quad (3.5)$$

где $\delta\varphi$ — угловая ширина сегмента, рад.;

R — радиус сферической поверхности, мм;

δh — высота сегмента, мм.

Сегменты представляют собой четырехугольные сферический фигуры, вершины которых находятся в точках пересечения меридиан и широт. Области, включающие полюса, образуют треугольники, площади которых равны четырехугольникам, описанным выше. Данный метод позволяет однозначно определить соседние точки без использования поисковых методов, поэтому он был выбран для моделирования по представленному ниже алгоритму.

Для построения сферических поверхностей шаг по высоте определяется путем деления значения диаметра на количество поясов сегментов, которое должно быть кратно 360 и в два раза меньше количества меридиан.

После генерации точек производится их пересчет в Декартову СК для выполнения дальнейших расчетов.

При построении сферических поверхностей деталей крышки и подпятника также производится учет конструктивных особенностей шарового шарнира. Так, например, при генерации поверхности крышки учитывается наличие осевого отверстия, обеспечивающего подвижность соединения.

Итоговый результат генерации сферических поверхностей деталей шарнира представлен на рисунке 3.11.

Следует отметить, что при данном методе точки равномерно распределены именно по площади сферической поверхности и строго упорядочены, хотя линейные расстояния между точками на разных широтах отличаются.

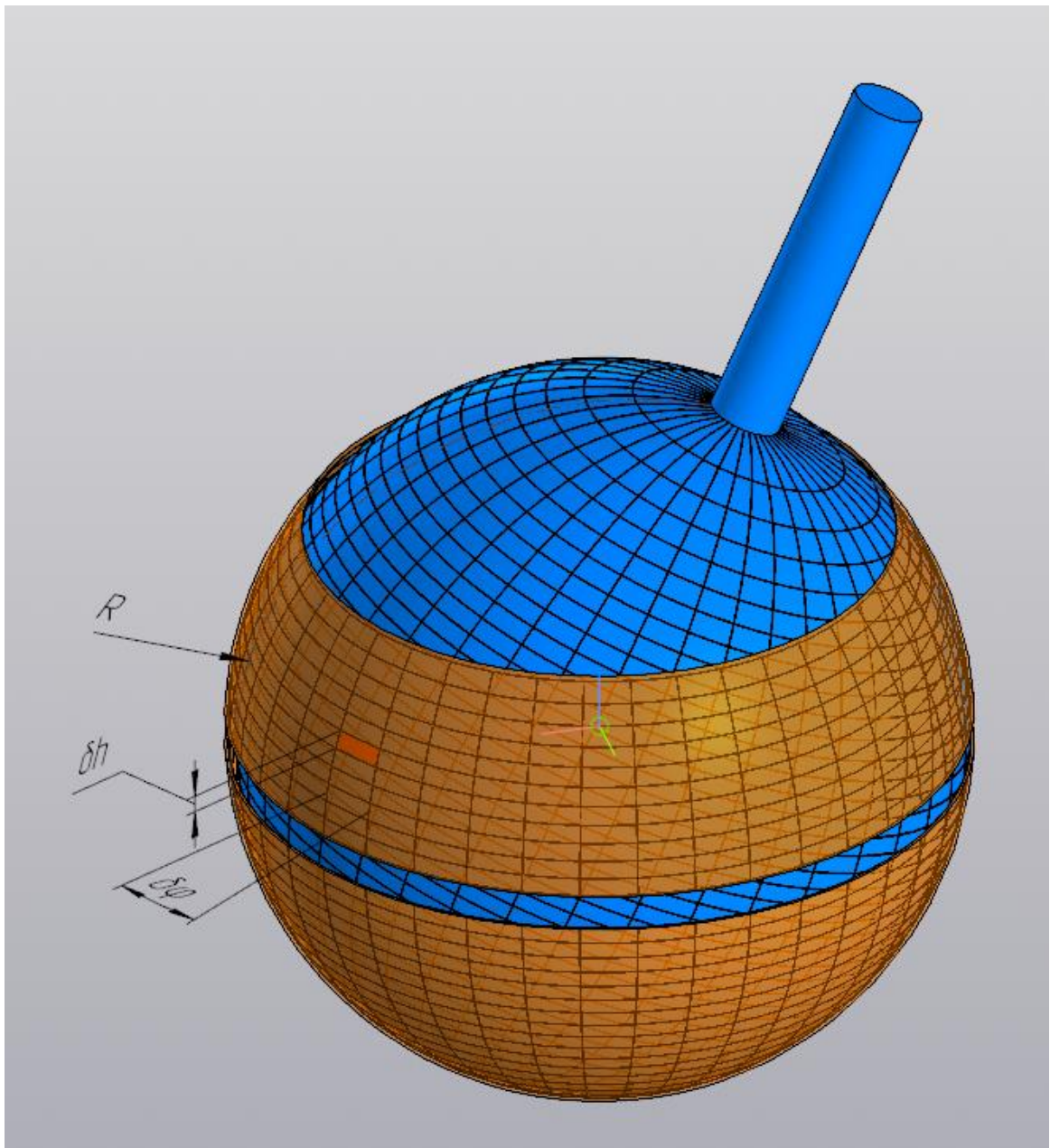


Рисунок 3.11 – Визуализация генерации сферической поверхности деталей шарнира

3.3.2 Смещение сферических поверхностей

Этап смещения поверхностей крышки и подпятника заключается в перемещении сферических поверхностей крышки и подпятника на величину минимального вертикального зазора и дополнительного заглубления. В результате смещения образуются зоны взаимопроникновения поверхностей крышки и подпятника с поверхностью шарового пальца.

Для выполнения смещения производятся следующие действия. Сначала для каждой точки поверхности пальца (k,n) с положительным значением координаты Z определяется сегмент поверхности крышки, который расположен вертикально над этой точкой (рисунке 3.12).

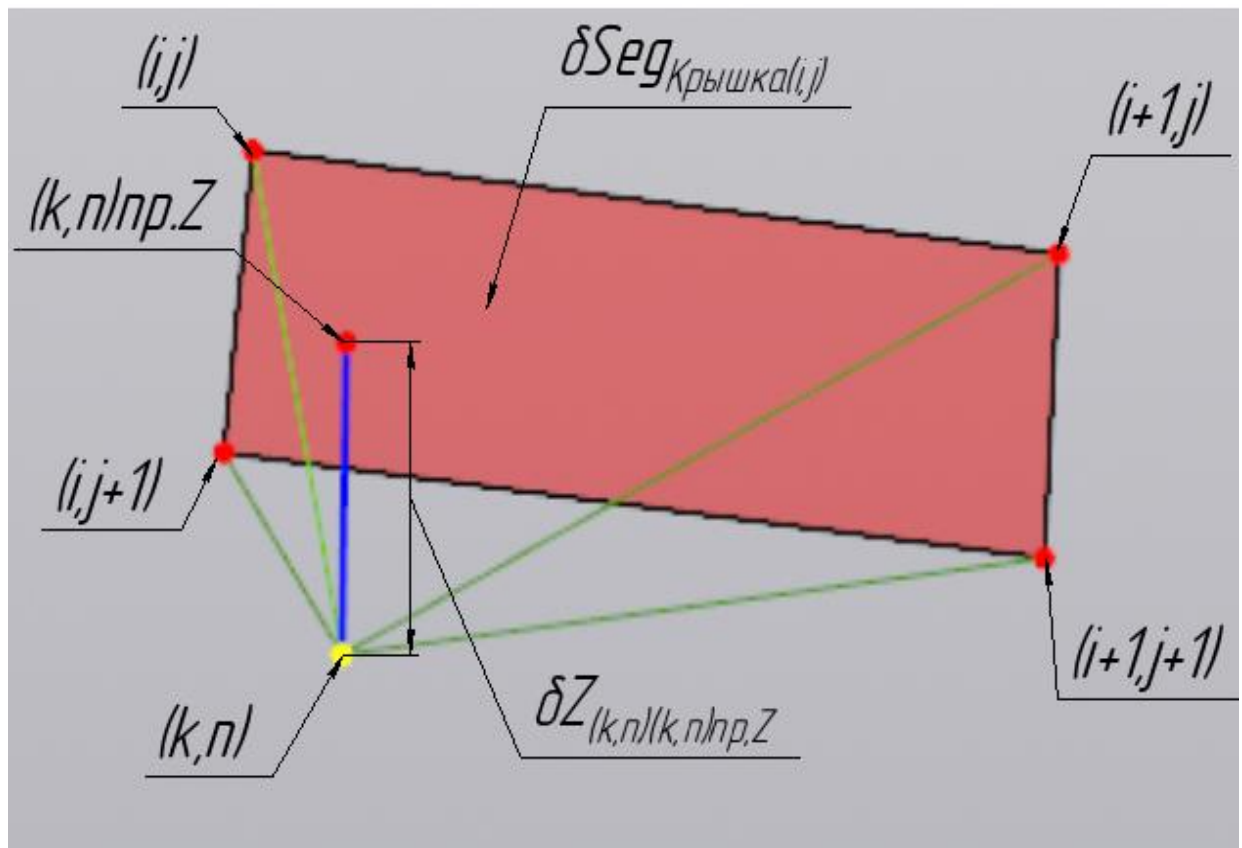


Рисунок 3.12 – Вертикальный зазор между пальцем и крышкой в точке (k,n)

Алгоритм поиска вертикального сегмента, находящегося над точкой поверхности пальца реализован следующим образом. Поиск осуществляется по координатам X и Y точек сферической поверхности. Сначала ищется координата вершины первого квадранта вертикального сегмента по условию целочисленного деления координаты широты на значение углового шага между меридианами. Поиск координаты высоты производится аналогичным методом с учетом расчета эквивалентной координаты Z по среднему радиусу крышки и подпятника. После определения координат точки первого квадранта

поверхности крышки (i,j) становятся известными остальные точки элементарного сегмента крышки в силу строгой упорядоченности построения точек.

Величина вертикального смещения $\delta Z_{(k,n)(k,n)пр.Z}$ определяется как сумма зазора между точкой поверхности пальца (k,n) элементарным сегментом поверхности крышки (i,j) и величины дополнительного заглубления. Расчет смещения производится согласно формуле среднего взвешенного значения [98]:

$$\delta Z_{(k,n)(k,n)пр.Z} = \frac{\sum_{ii=0}^1 \sum_{jj=0}^1 (Z_{(i+ii,j+jj)} - Z_{(k,n)}) \cdot w_{(i+ii,j+jj)}}{\sum_{ii=0}^1 \sum_{jj=0}^1 w_{(i+ii,j+jj)}} + d, \quad (3.6)$$

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 $w_{(i,j)}$ крышки зависит от расстояния до точки пальца и рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{(i,j)} = 1 / l_{(k,n)(i,j)пр.XY}, \quad (3.7)$$

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

После расчета всех зазоров производится смещение поверхности крышки на величину минимального зазора и дополнительного заглубления. Аналогичные расчеты и смещение производятся для поверхности подпятника.

3.3.3 Расчет распределения давления на сферических поверхностях

Этап силового расчета заключается в определении результирующей силы, действующей на сегмент пальца, находящийся в зоне его пересечения с сегментом крышки или подпятника. Разработанная имитационная модель в части силового расчета базируется на физике гидравлического взаимодействия. Детали шарнира рассматриваются как сплошные среды металлической плотности. При таком подходе в качестве эквивалента силового воздействия на сегмент выступает объем взаимного проникновения поверхностей (рисунок 3.13), который рассчитывается посредством построения эквивалентных контактных поверхностей крышки и подпятника. Для удобства выполнения расчета объема пересечения необходимо, чтобы полученные эквивалентные поверхности были условно эквидистантными относительно элементарных сегментов поверхности пальца.

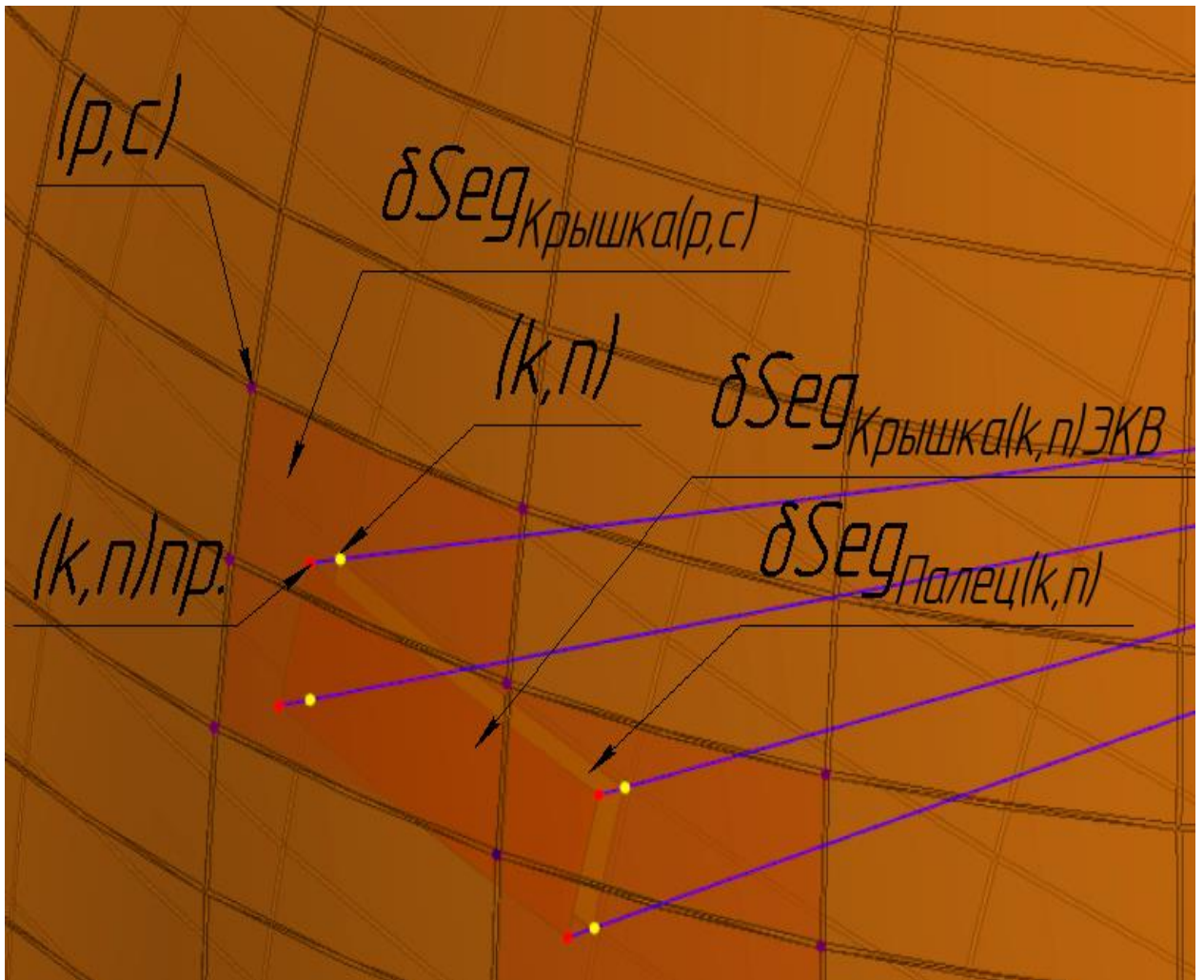


Рисунок 3.13 – Генерация эквивалентной поверхности крышки

Формирование эквивалентной поверхности крышки производится следующим образом.

Сначала ищется координата вершины первого квадранта по условию целочисленного деления координаты широты на значение углового шага между меридианами. Поиск координаты высоты производится аналогичным методом по условию целочисленного деления координаты Z точки пальца на значение шага по высоте между широтными сечениями крышки. После определения координат точки первого квадранта радиально расположенного сегмента поверхности крышки (p, c) становятся известными координаты остальных точек этого сегмента.

Найденный радиально расположенный сегмент пересекается лучом, проведенным из центра шарнира в направлении точки пальца (k, n) . В результате пересечения луча и радиально расположенного сегмента образуется проекционная точка $(k, n)_{пр.}$. Расстояние между точкой (k, n) и ее проекцией $(k, n)_{пр.}$ в радиальном направлении на найденный ближайший радиально расположенный сегмент поверхности крышки является радиальным зазором (рисунок 3.14).

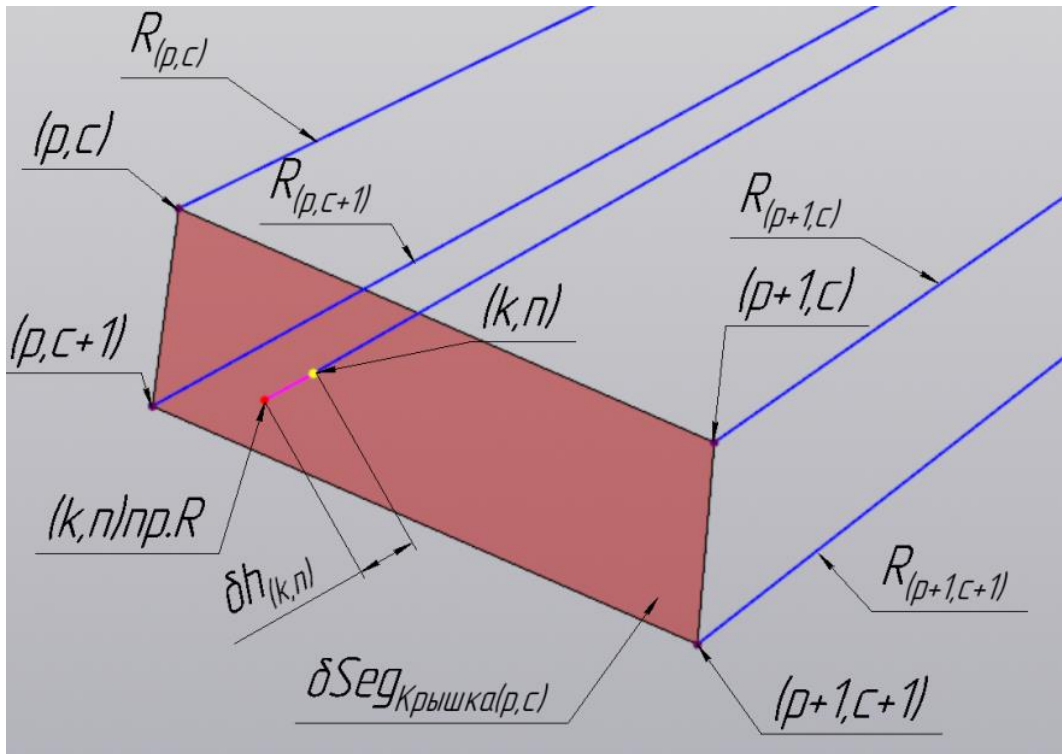


Рисунок 3.14 – Радиальный зазор между пальцем и крышкой в точке (k, n)

Расчет радиального зазора $\delta h_{(k,n)}$ между точкой поверхности пальца (k, n) и ближайшим радиально расположенным сегментом поверхности крышки (p, c) производится согласно формуле среднего взвешенного значения [98]:

$$\delta h_{(k,n)} = \frac{\sum_{pp=0}^1 \sum_{cc=0}^1 (R_{(p+pp, c+cc)} - R_{(k,n)}) \cdot w_{(p+pp, c+cc)}}{\sum_{pp=0}^1 \sum_{cc=0}^1 w_{(p+pp, c+cc)}}, \quad (3.8)$$

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 $w_{(p,c)}$ крышки зависит от расстояния до точки пальца и рассчитывается по следующей формуле:

$$w_{(p,c)} = 1 / (R_{(k,n)}, \widehat{R}_{(p,c)}), \quad (3.9)$$

где $(R_{(k,n)}, \widehat{R}_{(p,c)})$ — угол между радиусами с вершинами в точках крышки (p, c) и пальца (k, n), рад.

Рассчитанные величины зазоров могут принимать положительные и отрицательные значения в зависимости от условий контакта. Аналогичный расчет производится для поверхности подпятника.

После выполнения расчета радиальных зазоров происходит построение эквивалентной контактной поверхности крышки по вершинам радиальных проекций точек поверхности пальца на ближайшие радиально расположенные сегменты поверхности

крышки. В результате построения эквивалентной поверхности возможны шесть видов условий контакта, которые определяются вариантами комбинаций отрицательных и положительных зазоров (рисунок 3.15). Если между вершинами сегмента пальца и эквивалентного сегмента поверхности крышки все зазоры положительные, то в данный момент времени они не участвуют в силовом замыкании и, следовательно, не происходит съема припуска с этих сегментов (рисунок 3.15(a)). Если в результате построения эквивалентной поверхности образуются сегменты только с двумя не соседними вершинами с отрицательными зазорами (рисунок 3.15(e)), то производится пересчет поверхности с уплотнением сетки точек.

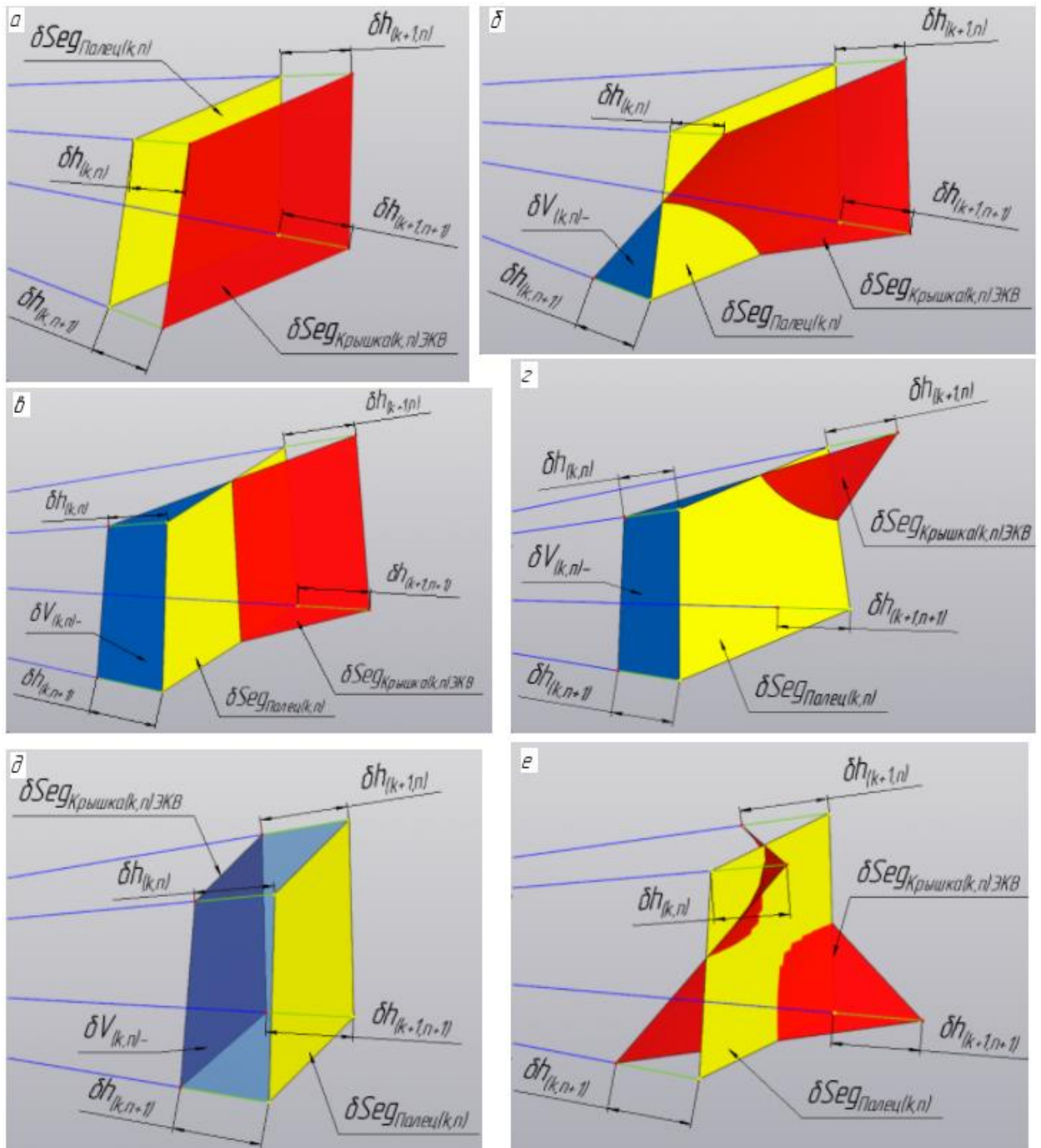


Рисунок 3.15 – Вариативность пересечения поверхностей сегментов

Расчет объема проникновения производится методом объемного интегрирования согласно следующей формуле [99]:

$$V = \iiint_G dx dy dz, \quad (3.10)$$

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 и шарового пальца согласно следующей формуле:

$$F_{(k,n)} = F \cdot \delta V_{(k,n)} / V, \quad (3.11)$$

где F — вертикальная сила, приложенная к крышке шарнира, Н;

$\delta V_{(k,n)}$ — объем пересечения для элементарного сегмента поверхности пальца (k,n) , мм³.

Аналогичный расчет производится для взаимодействия контактных поверхностей подпятника и шарового пальца.

Затем, для обеспечения баланса сил в соединении, выполняется расчет ответного силового воздействия по диаметрально противоположной части сферической поверхности шарового пальца, которая представляет собой полусферу (рисунок 3.16).

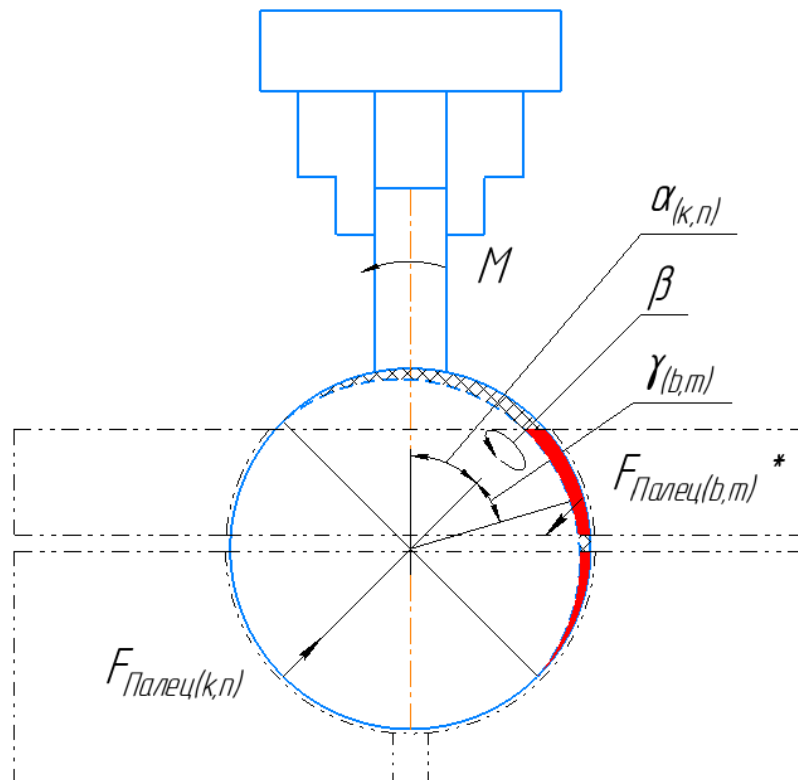


Рисунок 3.16 – Схема силового баланса в шарнире

При этом предполагается, что возникающий результирующий момент сил воспринимается несущей системой притирочного оборудования. Расчет ответного силового воздействия $F_{(b,m)}^*$ для диаметрально противоположных сегментов производится согласно доле объема пересечения сегмента от общего объема, расположенного на диаметрально противоположной поверхности, с учетом распределения по закону косинуса по следующей формуле [84]:

$$F_{(b,m)}^* = F_{(k,n)} \cdot \delta V_{(b,m)} \cdot \cos(\gamma_{(b,m)}) / \sum_{b=0} \sum_{m=0} \delta V_{(b,m)} \cdot \cos(\gamma_{(b,m)}), \quad (3.12)$$

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.

При наличии полного зазора на диаметрально противоположных сегментах учет распределения давления производится между сегментами в следующей последовательности. Сначала определяется сегмент с минимальным зазором. Затем происходит определение сегментов, зазор в которых не превышает сумму размера абразива и минимального зазора. Между полученными сегментами производится пересчет давления с учетом распределения по закону косинуса аналогично формуле (3.12).

Затем производится расчет результирующего силового воздействия согласно следующей формуле:

$$F_{\text{Рез}(k,n)} = 0,5 \cdot (F_{(k,n)} + \sum F_{(k,n)}^*). \quad (3.13)$$

Полученное значение силового фактора, действующего на элементарный сегмент поверхности шарового пальца в заданный момент времени, используется в дальнейшем при расчете съема припуска.

3.3.4 Расчет пройденных путей сегментами сферических поверхностей

На следующем этапе алгоритма происходит вращение сферической поверхности шарового пальца, поскольку он является подвижным компонентом шарового шарнира. Сначала производится расчет приращения сферических углов, определяющих положение тела в пространстве, за элементарный шаг по времени. Далее производится расчет координат точек поверхности пальца в результате его элементарного вращения посредством матрицы поворота [81].

Расчет движения крышки и подпятника относительно шарового пальца производится посредством первичного разложения вектора мгновенной оси вращения по

составляющим на оси декартовой СК шарнира. Затем выполняется расчет трех элементарных поворотов подпятника и крышки относительно их базового положения.

Далее производится расчет средней величины элементарного перемещения сегмента по формуле:

$$L_{\text{Сег}(k,n)} = \sum_{k=0}^1 \sum_{n=0}^1 L_{(k+n,k,n+n)} / 4, \quad (3.14)$$

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

В накоплении пути участвуют только те сегменты, которые находятся в зоне контакта крышки и подпятника с шаровым пальцем.

Само вращение в имитационной модели реализовано дискретным способом с интервалом по времени 0,01 сек. Траектория вращения определяется законом приращения скоростей сферического движения путем интегрирования уравнения скоростей.

3.3.5 Расчет радиального съема припуска сферических поверхностей

На заключительном этапе производится расчет величины элементарного радиального съема припуска с сегментов контактной сферической поверхности шарового пальца. Расчет производится по модифицированному уравнению Престона, которое выглядит следующим образом [20]:

$$H_{\text{Сег}(k,n)} = k F_{\text{Пез}(k,n)} \cdot L_{\text{Сег}(k,n)}, \quad (3.15)$$

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;

$L_{\text{Сег}(k,n)}$ — перемещение сегмента, мм.

Далее производится радиальное смещение точек контактной сферической поверхности шарового пальца на рассчитанную по формуле (3.37) величину съема припуска.

Аналогичное моделирование с 3 по 5 этапы производится для расчета радиального съема припуска с поверхностей крышки и подпятника. Отличие заключается в кинематическом расчете на 4 этапе, так как требуется определить перемещение крышки и подпятника относительно поверхности пальца. Также отличие имеется в расчете координат ближайших радиальных сегментов шарового пальца на 3 этапе расчета. Для поиска координаты высоты используется выражение через величину косинуса угла между вектором точки крышки или подпятника с вектором оси шарового пальца, а координата

меридиана рассчитывается через угол между проекциями векторов нулевого меридиана шарового пальца и вектором точки крышки или подпятника на плоскость, нормальную к оси шарового пальца.

3.4 Характеристика разработанного приложения

Разработанный аппаратно-программный комплекс (далее – АПК) информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования ВСП реализован в виде приложения Web-формата. В состав АПК входит 5 программ, описание и функционал которых приведены в таблице 3.2. Блок-схема общей структуры АПК представлена на рисунке А.1.

Таблица 3.2 – 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

Первая программа «Измерение геометрических характеристик деталей на КИМ» реализована в специализированном ПО, поставляемом совместно с КИМ. Результаты измерения выводятся машинным файлом, содержащим координаты измеренных точек сферических поверхностей деталей.

Вторая программа «Визуализация и первичная аналитика» производит чтение машинных данных результатов измерения с КИМ. Далее в программе производится расчет основных геометрических параметров сферических поверхностей деталей шарнира и интерполяция промежуточных значений узлов расчетной сетки. Затем определяется первичный контакт в соединении и его характеристики. После чего производится выгрузка полученных результатов для дальнейших расчетов. Блок-схема алгоритма программы представлена на рисунке А.2.

Третья программа «Имитационное моделирование ВСП» сначала осуществляет чтение данных из второй и четвертой программ. Затем в программе формируется массив данных для узлов расчетной сетки поверхности деталей шарнира и задаются параметры стратегии обработки. Дальнейший алгоритм программы подробно изложен в разделе 3.3. Блок-схема алгоритма программы представлен на рисунке А.3.

Четвертая программа «Организация и управление стратегией экспериментальных исследований» в начале осуществляет чтение данных по планированию компьютерного эксперимента. Формирование матрицы опытов производится в стандартном файле расширения *.txt. В качестве исходных данных матрицы опытов указываются следующие параметры: законы приращения скоростей сферического движения, стартовые значения углов ориентации шарового пальца, максимально допустимое значение угла нутации, конструктивные особенности крышки и подпятника, стартовое значение шага сетки точек при генерации сферических поверхностей и ограничение по времени моделирования. Далее в программе проводится компьютерный эксперимент и обрабатываются данные моделирования с формированием базы знаний. В последствии после накопления достаточного количества информации в базе знаний можно будет использовать нейросети для планирования компьютерного эксперимента и определения рациональных стратегий обработки. Внешний вид программы продемонстрирован на рисунке 3.17. Блок-схема алгоритма программы представлена на рисунке А.4.

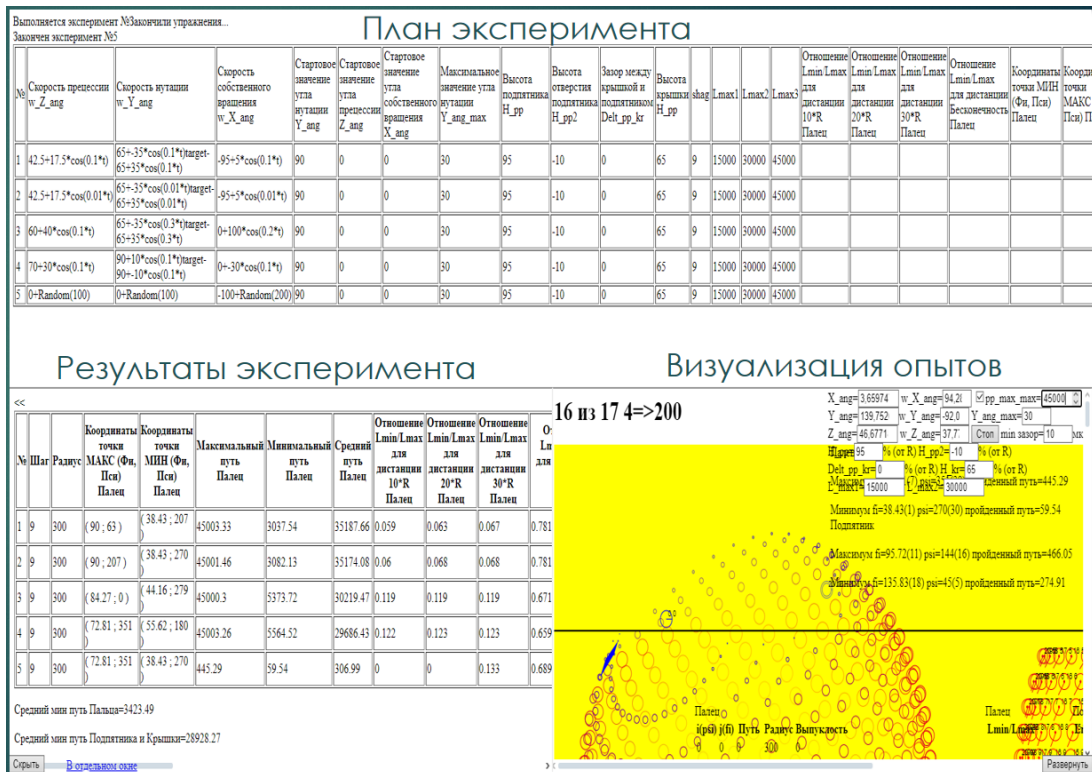


Рисунок 3.17 – Интерфейс программы «Организация и управление стратегией экспериментальных исследований»

Пятая программа «Визуализация и аналитика результатов практики и моделирования» сначала осуществляет сбор данных из второй и третьей программ. Далее в программе производится расчет и оценка результатов моделирования с результатами проведенного эксперимента по ключевым критериям сходимости.

Сходимость среднего радиуса сферического соединения рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{рад}} = 1 - 2 \cdot |R_{\text{практ}} - R_{\text{теор}}| / (R_{\text{практ}} + R_{\text{теор}}) \geq 0,95, \quad (3.16)$$

где $R_{\text{практ}}, R_{\text{теор}}$ — средний радиус практического измерения и при имитационном моделировании соответственно, мм.

Сходимость отклонения от сферичности рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{откл}} = 1 - |\sigma_{\text{практ}} - \sigma_{\text{теор}}| / 100 \geq 0,75, \quad (3.17)$$

где $\sigma_{\text{практ}}, \sigma_{\text{теор}}$ — среднеквадратичное значение отклонения от сферичности практического измерения и при имитационном моделировании соответственно.

Сходимость топологии пятна контакта рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{топ}} = 1 - 2 \cdot |n_{\text{пик.практ}} - n_{\text{пик.теор}}| / (n_{\text{пик.практ}} + n_{\text{пик.теор}}) \geq 0,80, \quad (3.18)$$

где $n_{\text{пик.практ}}, n_{\text{пик.теор}}$ — количество пиков пятна контакта практического измерения и при имитационном моделировании соответственно.

Сходимость формы пятна контакта рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{форм}} = 1 - \sum_{i=1}^{n_{\text{пик}}} (|\sigma_{i\Delta R_{\text{практ}}} - \sigma_{i\Delta R_{\text{теор}}}| / (\sigma_{i\Delta R_{\text{практ}}} + \sigma_{i\Delta R_{\text{теор}}})) / n_{\text{пик}} \geq 0,75, \quad (3.19)$$

где $\sigma_{i\Delta R_{\text{практ}}}, \sigma_{i\Delta R_{\text{теор}}}$ — среднеквадратичное значение отклонения границы пятна контакта от эквивалентной окружности практического измерения и при имитационном моделировании соответственно;

$n_{\text{пик}}$ — количество подобных пиков пятен контакта практического измерения и при имитационном моделировании.

Сходимость расположения пятна контакта рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{расп}} = 1 - \sum_{i=1}^{n_{\text{пик}}} \alpha_i / n_{\text{пик}} \geq 0,85, \quad (3.20)$$

где α_i — угол между подобными пиками пятен контакта практического измерения и при имитационном моделировании.

Сходимость площади пятна контакта рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{пл}} = 1 - \sum_{i=1}^{n_{\text{пят}}} (|S_{i\text{практ}} - S_{i\text{теор}}| / S_{\text{сфер}}) \geq 0,85, \quad (3.21)$$

где $S_{i\text{практ}}, S_{i\text{теор}}$ — площади подобных пятен контакта практического измерения и при имитационном моделировании соответственно;

$S_{\text{сфер}}$ — площадь сферического соединения;

$n_{\text{пят}}$ — количество подобных пятен контакта практического измерения и при имитационном моделировании.

Общая сходимость результатов моделирования с результатами проведенного эксперимента рассчитывается как среднее значение критериев сходимости при равных весовых значениях параметров.

Полученные результаты расчетов пятой программы выгружаются в базу знаний. Блок-схема алгоритма программы представлена на рисунке А.5.

Разработанный АПК продолжает концепцию существующих программ имитационного моделирования [41-53], учитывающий, в отличие от существующих моделей схожих процессов, особенности сферического контакта. Для наглядности представления процесса ВСП в приложении имеется окно визуализации кинематики и съема припуска с притираемых поверхностей шарового шарнира. Также для каждого опыта строятся градиентные карты съема припуска со сферической поверхности. Предложенный АПК является основой для создания системы управления процессом ВСП. Функционал АПК позволят производить оценку результатов процесса ВСП, что является основой для определения и генерации рациональных стратегий обработки при заданных параметрах качества изделия со сферическим соединением деталей.

В разработанном АПК имеется следующий ряд допущений, которые позволяют упростить расчет без потери его адекватности:

1. Предложенный алгоритм имитационного моделирования базируется на модели гидравлического взаимодействия сплошных сред и рассматривает компоненты шарового шарнира как жидкости металлической плотности. Основанием данного допущения являются физические аспекты происходящих явлений в процессе притирки. Так, например, изнашивание контактных поверхностей деталей происходит с образованием стружки. Гидродинамические модели основываются на методе конечных объемов и позволяют, при необходимости, учесть потоки образовавшихся стружек.

2. При моделировании поверхности крышки и подпятника могут смещаться только в вертикальном направлении без наклона. Такое допущение существенно сокращает расчетную часть.

3. Съем припуска с сегмента линейно зависит от результирующей силы и величины перемещения сегмента.

4. Абразив в процессе притирки равномерно распределен по сферической поверхности в зоне контакта и сохраняет постоянство режущей способности.

5. Площади сегментов в процессе притирки не изменяются.

Представленные допущения при необходимости можно будет частично или полностью устранить посредством усложнения модели.

3.5 Выводы по третьей главе

1. При выборе инструментария имитационного моделирования был проведен сравнительный анализ существующих программных продуктов, позволяющих разработать модель. Анализ показал, что наиболее целесообразным способом является разработка собственного ПО на открытых языках программирования, поскольку в имеющихся ПО существует ряд ограничений по чтению данных практических исследований, полученных от используемого оборудования, и с зависимостью от прикладных библиотек.

2. Были определены основные управляемые факторы процесса ВСП: скорость и давление притирки, параметры абразивной смеси. В части кинематики и динамики процесса притирки рассмотрены основные подходы в описании и определены подходящие модели описания физических процессов для разработки имитационной модели и описания кинематики притирочного стенда.

3. При разработке алгоритма имитационного моделирования были учтены основные управляемые и неуправляемые факторы процесса ВСП, а также особенности сферического контакта. Предложена новая модель распределения давления в сферическом соединении, базирующаяся на физике гидравлического взаимодействия. При таком подходе детали шарнира рассматриваются как сплошные среды металлической плотности, а в качестве эквивалента силового воздействия выступает объем взаимного проникновения поверхностей.

4. Предложенный АПК информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования процесса ВСП реализован в формате Web-приложения. Разработанное приложение состоит из 5 программ, которые позволяют производить как широкоплановые исследования съема припуска с контактных поверхностей деталей шарового шарнира в процессе притирки, так и оценивать характер распределения пятна контакта в сферическом соединении. Таким образом, разработанный АПК является основой для создания системы управления процессом ВСП, которая позволит определять и генерировать рациональные стратегии обработки изделий со сферическим соединением деталей.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ СЪЕМА ПРИПУСКА С КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СФЕРИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ

Задача управления качеством обрабатываемого изделия является весьма трудоемкой. Суть задачи сводится к управлению съемом припуска со сферических поверхностей в процессе ВСП. Интенсивность съема припуска на локальном участке в процессе обработки определяется сочетанием факторов процесса ВСП.

Поскольку на процесс притирки влияет несколько десятков факторов, то проведение полнофакторного эксперимента является весьма затруднительной задачей. Для улучшения управляемости качеством ВСП было решено использовать метод имитационного моделирования процесса обработки. Разработанная имитационная модель (глава 2) предназначена для проведения различных широкоплановых исследований без существенных временных и материальных затрат.

Комплексная апробация имитационной модели процесса ВСП производилась на основе данных, полученных из лабораторного эксперимента по съему припуска с контактных поверхностей сферических поверхностей деталей шарового шарнира.

Планирование и проведение лабораторного эксперимента производилось на базе проектного центра Института судостроения и морской арктической техники (Севмашвтуз), входящего в состав ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова».

4.1 Планирование эксперимента

4.1.1 Установление цели эксперимента

В ходе проведенного предварительного анализа научно-технической литературы было установлено, что в качестве основных управляемых факторов процесса притирки выступают динамические и кинематические факторы (главы 1-2). Поскольку в процессе ВСП давление постоянно перераспределяется, а распределение давления в зоне контакта зависит от геометрической точности заготовок, то локализация давления в определенном участке является весьма трудоемкой задачей. В силу изложенного обстоятельства управление рабочим давлением в процессе ВСП производится только по величине усилия. Следовательно, основными управляемыми факторами ВСП являются именно

кинематические параметры процесса обработки, что подробнее изложено в разделе 3.2 и подтверждается данными проведенных исследований [100].

В качестве рабочей гипотезы исследования выдвинуто предположение, что характер съема припуска с поверхности в процессе ВСП главным образом определяется траекторией движений обработки и исходной геометрией заготовок.

Целью проведения эксперимента являлось установление связи кинематических параметров процесса ВСП с качеством обрабатываемых контактных сферических поверхностей деталей шарового шарнира. Вид эксперимента – физический исследовательский, количественный. Вид испытаний был определен как нормальный в лабораторных условиях.

4.1.2 Условия проведения эксперимента

На первом этапе практической части исследования необходимо было определить особенности протекания процесса притирки. Позже полученные сведения легли в основу практических предложений и рекомендаций для машиностроительного производства, а также стали базой для планирования эксперимента по определению максимальной производительности на следующих этапах исследования.

Эксперимент проводился на притирочном стенде (рисунок 2.16) собственной разработки, описание которого изложено в разделе 2.1. В качестве объекта эксперимента выступал трехкомпонентный шаровой шарнир с диаметром сферической поверхности 20 мм (рисунок 4.1), описание которого изложено в разделе 1.3. Количество образцов шаровых шарниров равнялось 5 штукам.

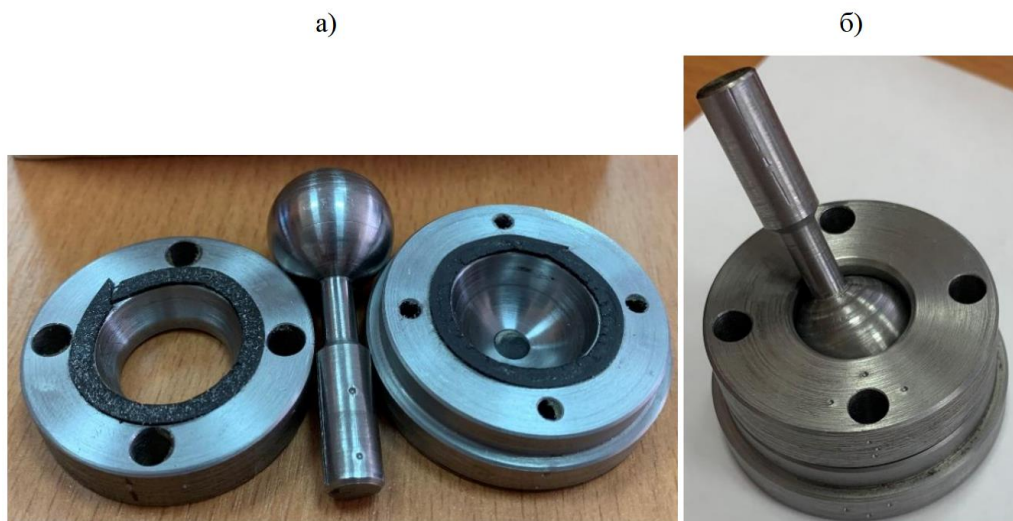


Рисунок 4.1 – Внешний вид шарового шарнира (а) в разобранном и (б) собранном состоянии

4.1.3 Выбор значений факторов эксперимента

При планировании эксперимента значения технологических и динамических факторов процесса притирки устанавливались с учетом рекомендаций, изложенных в нормативно-справочной и научно-технической литературе [3,4,7-12]. Геометрический фактор точности сферических поверхностей заготовок учитывался путем прямых контактных измерений. Значения не варьируемых факторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Факторы с постоянным значением параметра

Группа	Фактор	Значение (погрешность), ед. изм.	Примечание
Технологические факторы	Время обработки	2400 (± 10), сек.	Один опыт разбит на четыре равных по продолжительности перехода.
	Абразивная смесь	Алмазная паста АСМ 7/5 НОМ; масса порции 4 (± 10), гр.	Концентрация абразива – 4%. После каждого перехода производится очистка зоны обработки и нанесение новой пасты.
	Материал деталей	Сталь 20 ГОСТ 1050-2013	-
	Усилие прижима деталей	54,2 ($\pm 0,1$), Н	Прикладывается вертикальная сила, посредством рычажной системы оказания давления. Масса груза 1807 гр.
Динамические факторы	Закон нагружения	Постоянная нагрузка	-
	Силы инерции	-	Не учитываются
Геометрические факторы	Шероховатость заготовок	Ra (1,25 \pm 0,5), мкм	Контроль на детали «Палец шаровой»

Поскольку распределения давления в зоне контакта является значимым фактором в процессе притирки, а закон нагружения определен как постоянный, то существенное влияние на характер распределения давления по контактными поверхностям оказывает фактическая геометрия сферических поверхностей деталей шарнира до и в процессе притирки, а также ориентация шарового пальца относительно крышки и подпятника во время обработки. Характер изменения формы сферических поверхностей деталей в процессе притирки является предметом текущего раздела исследования и определяется посредством проведения физического эксперимента по ВСП.

При подборе значений кинематических факторов процесса притирки учитывалось то обстоятельство, что при сферическом движении невозможно добиться равенства мгновенных линейных скоростей точек сферической поверхности в силу геометрического аспекта задачи (раздел 3.2.3). Так, например, мгновенные линейные скорости точек шарового пальца, расположенные на мгновенной оси вращения, равны нулю. Максимальные мгновенные линейные скорости приобретают точки тела максимально удаленные от мгновенной оси вращения. Для тел типа шар эти точки образуют окружность, которая расположена в экваториальной плоскости, проходящей через центр шара и перпендикулярной мгновенной оси вращения. Поэтому для сферической притирки возможно рассмотрение задачи равенства средних локальных скоростей элементарных сегментов сферической поверхности. А поскольку у шарового пальца часть поверхности не находится в контакте из-за конструктивных особенностей изделия, то задача определения средних скоростей сводится к расчету накопленных относительных путей, пройденных элементарными сегментами сферических поверхностей деталей при нахождении их в зоне контакта сферического соединения.

Таким образом, при составлении плана эксперимента необходимо было провести дополнительное исследование по распределению накапливаемых относительных путей элементарными сегментами сферической поверхности, чтобы подобрать стратегии обработки с различными вариациями карт накопленных путей.

4.1.4 Составление плана эксперимента

Составление плана эксперимента производилось по варьированию кинематических факторов процесса притирки. Подбор значений параметров скоростей сферического движений производился с использованием разработанной имитационной модели притирки (глава 2). Поскольку при моделировании кинематики сферического движения имеет значение взаимное отношение величин скоростей сферического движения, то

абсолютные значения скоростей влияют лишь на время, затрачиваемое на прохождение дистанции сегментами сферической поверхности.

Моделирование производилось в несколько этапов. Для каждого этапа формировался план серии опытов с учетом предыдущих для исключения дублирования опытов с одинаковым соотношением скоростей вращения.

После проведения серии опытов производился расчет основных статистических показателей, а также строились развертки градиентных карт пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности. Подробное описание и результаты имитационного моделирования были опубликованы в виде статьи в рецензируемом журнале [101].

Выбранные значения кинематических факторов процесса притирки для текущего исследования имеют различный характер пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей. Значения кинематических параметров сведены в таблицу 4.2. Карты пройденных путей для шарового пальца и крышки с подпятником при подобранных стратегиях обработки представлены на рисунках Б.1-Б.10, характеристика накопленных путей сведена в таблицу Б.1, в которой параметрами L_{min} , L_{max} и L_{mean} обозначены минимальный, максимальный и средний пройденный путь сферическими сегментами соответственно.

Таблица 4.2 – Кинематические параметры притирки

№ опыта	№ образца шарнира	Стартовое значение угла нутации θ , град	Скорость прецессии ω_{ψ} град/с	Средняя скорость нутации ω_{θ} град/с	Скорость собственного вращения ω_{ϕ} , град/с
1	1	0	0	0	60
2	2	30	0	0	60
3	3	30	60	0	45
4	4	0	15	60	30
5	5	0	60	15	-30

Стратегия для опыта 1 и 2 необходимы для первичной апробации имитационной модели, так как имеют самую простую кинематику. Стратегии 3-5 представляют кинематику сложного сферического движения, и обеспечивают разный характер пройденных путей.

4.1.5 Методики выполнения измерений

Измерения геометрических параметров образцов шаровых шарниров выполнялись согласно следующим нормативным документам: ГОСТ 8.050-73, ГОСТ 6507-90. Перед проведением измерений детали очищались от загрязнений и обезжиривались ацетоном.

Для проведения измерений геометрических характеристик до и после проведения опытов использовалась КИМ фирмы Carl Zeiss, модель Prismo Navigator 9/12/7 (рисунок 2.17), описание которой представлено в разделе 2.2.1. Промежуточные измерения диаметра сферической поверхности шарового пальца между переходами в рамках одного опыта выполнялись с использованием цифрового микрометра МКЦ 25 (рисунок 2.20), описание которой представлено в разделе 2.2.3. Для оценки наличия шаржированных зерен на сферической поверхности после притирки использовался микроскоп Альтами МЕТ 4С (рисунок 4.2).



Рисунок 4.2 – Внешний вид микроскопа Альтами МЕТ 4С

Методика измерений на КИМ заключалась в следующем. Деталь шарнира устанавливалась на рабочий стол КИМ с ориентированием по специально подготовленной метке вдоль оси ОУ машины. Угловая погрешность установки деталей не превышала 0,5 град. Затем запускалась программа измерений, по которой КИМ сканировала широтные сечения сферической поверхности детали шарнира выполняя безотрывное обкатывание щупа по детали. Общая характеристика измерений по типам деталей приведена в таблице 4.3. Наглядное представление траекторий перемещения измерительного щупа при сканировании сферической поверхности на примере детали «Крышка» продемонстрировано на рисунке 4.3. Графическое отображение передаваемых данных результатов измерений в приложение имитационного моделирования показано на рисунке 4.4.

Таблица 4.3 – Характеристика измерений на КИМ

Параметр	Деталь сферического шарнира		
	Крышка	Подпятник	Шаровой палец
Количество сечений, шт.	5	9	19
Шаг по высоте между сечениями, мм	$1 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,01$	$1 \pm 0,01$
Шаг между соседними точками в сечении, мм	$0,1 \pm 0,02$	$0,1 \pm 0,02$	$0,5 \pm 0,02$
Общее количество точек, шт.	2510 ± 10	4030 ± 10	2300 ± 10
Погрешность измерения, мкм	$0,957 \pm 0,05$	$0,957 \pm 0,05$	$0,957 \pm 0,05$

*Траектория перемещения
щупа при измерении*

Точка измерения

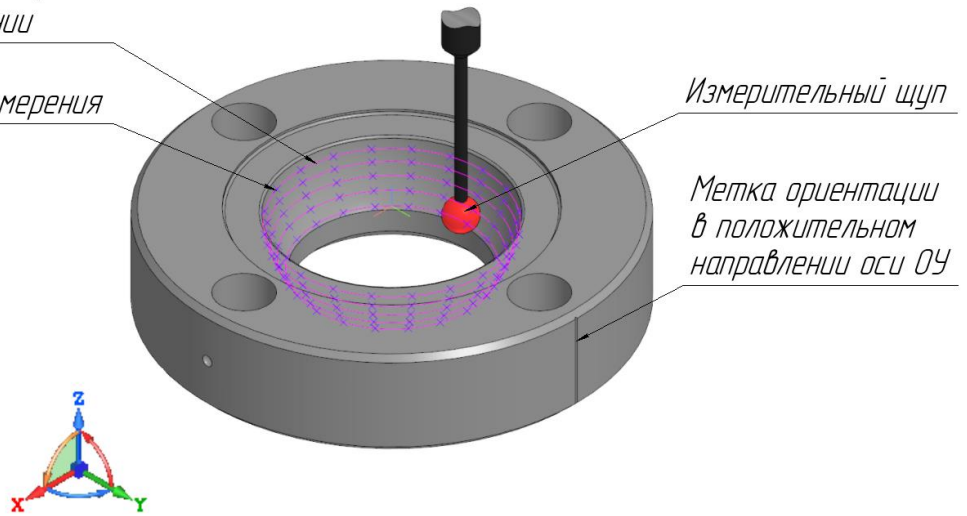


Рисунок 4.3 – Траектории перемещения щупа КИМ по детали «Крышка»

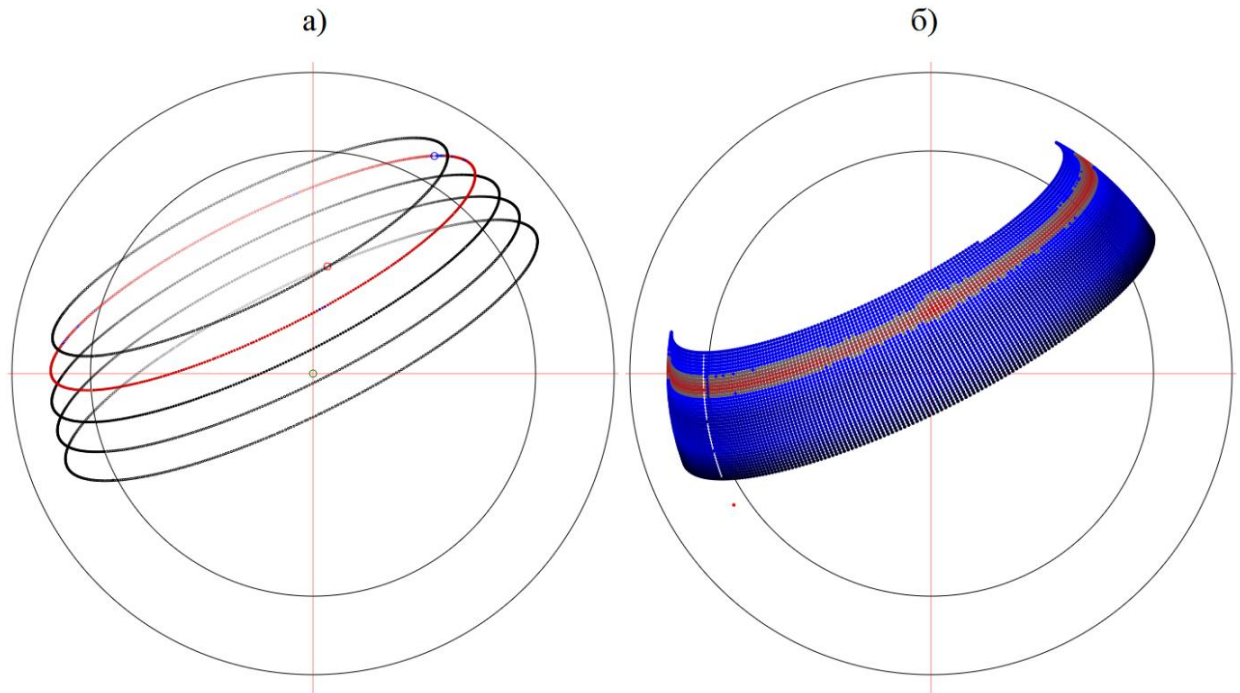


Рисунок 4.4 – Представление сферической поверхности детали «Крышка» в виде набора точек (а) измеренных на КИМ, (б) интерполированных по теоретической сетке

Методика измерений микрометром заключалась в следующем. Деталь шаровой палец устанавливалась в трехкулачковый патрон делительного механизма. Затем производилась серия измерений диаметров в сечении. После осуществлялся поворот детали на 60 градусов для проведения измерений в другом сечении. Общая схема измерений представлена на рисунке 4.5. Где n – номер сечения для проведения измерений, от 0 до 5.

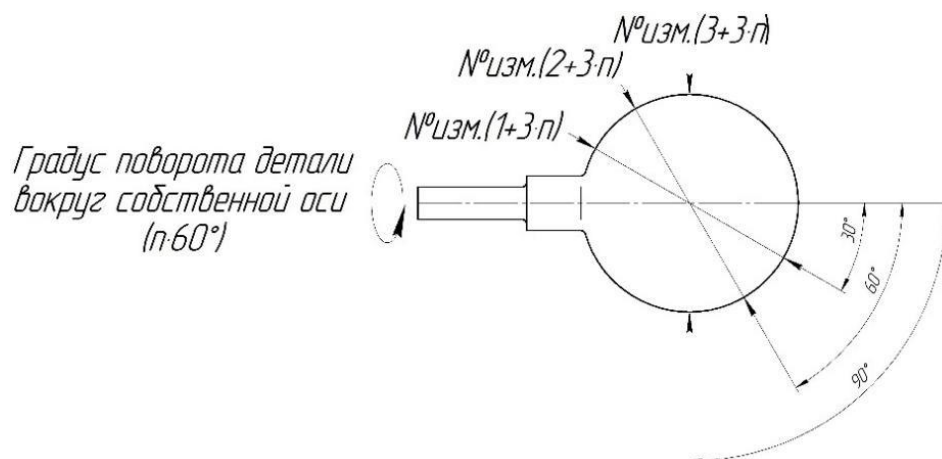


Рисунок 4.5 – Схема измерения диаметра

Измерения, выполненные микрометром, имеют на порядок меньшую точность, а также не позволяют оценить фактическое радиальное отклонение. Данные измерения производились для анализа общей динамики процесса съема припуска.

4.1.6 Методики обработки экспериментальных данных

Оценка геометрических параметров качества сферического соединения производилась по данным полученным с КИМ. В качестве оценочных параметров выступали средний радиус детали и соединения, отклонение от сферичности и относительная площадь пятна контакта. Все расчеты производились в разработанном АПК информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования ВСП (раздел 3.4).

Расчет среднего радиуса производится по следующему алгоритму:

1. Поиск центра по условию минимума дисперсии. Погрешность определения центра была назначена в размере десятой доли погрешности измерения и равнялась 0,1 мкм.

2. Пересчет нового положения центра сферической поверхности при условии отсечения 10% точек от нижней и верхней границ распределения, по аналогичным условиям предыдущего пункта.

3. Расчет значения среднего радиуса с учетом отсечения 10% точек от нижней и верхней границ распределения относительного нового положения центра сферической поверхности.

В качестве среднего радиуса сферического соединения был принят средний радиус шарового пальца, так как шаровой палец контактирует попарно с остальными деталями шарнира и имеет наибольшую площадь сферической поверхности.

Расчет отклонения от сферичности вычислялся как разница значений максимального и минимального радиуса среди измеренных точек относительного нового положения центра сферической поверхности.

Расчет относительной площади пятна контакта производился по следующему алгоритму:

1. 3D-построение сферических поверхностей границ условий контакта, центры которых концентричны новому центру сферической поверхности детали шарнира. Первая граничная поверхность является нижней границей условий контакта, вторая граничная поверхность – верхняя граница условия контакта. Первая граничная поверхность имеет радиус поверхности, равный среднему радиусу сферического соединения за вычетом половины величины допуска на отклонение от сферичности. В случае крышки и подпятника вторая граничная поверхность имеет радиус поверхности, равный сумме среднего радиуса сферического соединения, половины величины допуска на отклонение от сферичности и допустимого радиального зазора. В случае шарового пальца вторая граничная поверхность имеет радиус поверхности, равный сумме среднего радиуса сферического соединения и половины величины допуска на отклонение от сферичности.

2. Вертикальное смещение сферических поверхностей крышки или подпятника до возникновения контакта первой граничной поверхности с поверхностью крышки или подпятника. При этом допускаемая величина пересечения первой граничной поверхности с измеренной поверхностью не превышала 1% от общей площади сферической поверхности детали. Для детали шарового пальца смещение граничных поверхностей не производилось.

3. Расчет отношения площади пятна контакта сферической поверхности детали шарнира, находящегося между граничными поверхностями условий контакта, к общей площади сферической поверхности детали.

4. Расчет относительной площади пятна контакта в сферическом соединении по среднему значению относительной площади пятна контакта деталей шарнира.

По результатам расчета строились карты распределения пятна контакта в сферическом соединении по отдельным деталям. Промежуточные значения координат точек сферической поверхности рассчитывались методом линейной интерполяции.

При построении карт распределения пятна контакта для шарового пальца была установлена следующая цветовая палитра: зеленым цветом обозначены области сферической поверхности с нормальным условием контакта, красным – области с гиперконтактом, синим – области с зазором.

Для крышки и подпятника была принята следующая палитра: красным цветом обозначены области сферической поверхности с нормальным условием контакта, синим – области с зазором. На картах по вертикали отложены значения широты θ , по горизонтали – меридиана φ .

4.2 Обсуждение полученных результатов

Обработанные данные результатов измерения геометрических параметров сферических поверхностей деталей шаровых шарниров и соединения в сборе до и после притирки представлены в сводных таблицах 4.4 – 4.7.

Таблица 4.4 – Геометрические параметры деталей шарниров до притирки

Деталь шарнира	№ образца шарнира	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	1	10,0368	34,1	15,2
	2	10,0284	22,2	40,9
	3	10,0430	35,0	29,2
	4	10,0082	13,6	45,0
	5	10,0083	6,7	43,5
Подпятник	1	10,0226	94,2	33,8
	2	10,0415	55,9	24,1
	3	10,0312	33,5	53,0
	4	10,0118	48,6	41,6
	5	10,0202	75,9	14,0
Шаровой палец	1	9,9791	30,5	8,0
	2	10,0008	31,8	12,1
	3	9,9839	25,6	8,9
	4	9,9764	17,8	17,2
	5	9,9765	33,3	12,0

Таблица 4.5 – Геометрические параметры деталей шарниров после притирки

Деталь шарнира	№ образца шарнира	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	1	10,0385	36,0	12,9
	2	10,0268	20,3	20,7
	3	10,0340	36,7	36,4
	4	9,9964	16,4	60,7
	5	9,9976	14,4	77,5
Подпятник	1	10,0199	80,3	38,2
	2	10,0295	55,8	24,1
	3	10,0198	33,9	53,2
	4	10,0108	57,4	34,0
	5	10,0175	62,6	68,7
Шаровой палец	1	9,9797	33,0	9,9
	2	10,002	26,6	12,0
	3	9,9792	17,9	19,8
	4	9,9688	21,1	16,9
	5	9,9688	22,6	26,1

Таблица 4.6 – Геометрические параметры сферического соединения до притирки

№ образца шарнира	Параметр сферического соединения		
	Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
1	9,9791	64,2	40,3
2	10,0008	39,1	41,6
3	9,9839	34,3	65,5
4	9,9764	31,1	60,9
5	9,9765	41,3	28,8

Таблица 4.7 – 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

Из полученных данных было выявлено, что в процессе притирки происходит постепенное уменьшение среднего радиуса сферического соединения и увеличение отклонения от сферичности. Первое обстоятельство подтверждает представления о физике протекания процесса притирки. Второе обстоятельство является неизбежным

явлением в силу наличия первого обстоятельства, поскольку у деталей «Крышка» и «Подпятник» в околоэкваториальных участках средний радиус сферической поверхности превышал радиус шарового пальца на 20...30 мкм. Таким образом обработка этих зон не происходила в силу наличия повышенного радиального зазора, превышающего размер абразивных зерен.

Для опытов №2-5 наименьший съем припуска у детали «Шаровой палец» наблюдался на участке сферической поверхности, находящейся вблизи полюса со стороны цилиндрической ступени. Опыт №1 не рассматривался в этом аспекте, поскольку соответствующая часть сферической поверхности шарового пальца не находилась в зоне обработки во время притирки. Наибольший съем припуска возникал на участках сферической поверхности, где произведение факторов локального давления и скорости имеет наибольшее значение. Представленные данные согласуются со сформулированной предварительно гипотезой о характере съема припуска при ВСП.

Также из полученных данных было установлено, что на величину съема припуска с контактной поверхности в процессе притирки значительное влияние оказывает динамическое перераспределение абразивной смеси в зазоре. Характер перераспределения смеси главным образом определяется кинематикой процесса. Так, например, для опытов №1-2 основной процесс съема припуска происходил в начале каждого перехода. Затем абразивная смесь перераспределялась в зазорах сферического соединения. Как следствие, съем припуска со сферических поверхностей деталей образцов шарниров 1 и 2 был значительно меньше, чем у остальных образцов.

Таким образом, значимое влияние, помимо факторов давления и скорости процесса притирки, оказывает фактор характера распределения абразивной смеси в соединении. Данный фактор входит в состав комплексного параметра – коэффициента Престона. Следовательно, коэффициент Престона является зависимым от кинематических факторов процесса притирки.

Учитывая вышеизложенное обстоятельство, был выдвинут тезис, что значение коэффициента Престона в процессе ВСП снижается интенсивнее при сохранении ориентации результирующего вектора скорости, чем при изменении направления результирующего вектора скорости. Основанием данного тезиса является следующее логическое умозаключение. На чистовом этапе процесса ВСП модули локальных линейных скоростей не превышают 5 м/мин, а частота вращения подвижной детали не превышает 2 об/с. При таких параметрах возникающие центробежные силы, действующие на абразивную смесь, оказывают меньшее влияние на распределение абразивной смеси в зоне обработки, чем эффект гидроклина от сил давления. Таким образом, абразивная

смесь стремится перераспределиться в области повышенных зазоров при сохранении направления результирующего вектора скорости. При изменении направления векторов локальных скоростей, не кратных 2π , происходит обратный эффект: когда эффект гидроклина возникает на других участках, в которых скопилась абразивная смесь и происходит ее повторное перераспределение.

Далее по результатам измерений были сгенерированы карты распределения пятна контакта в сферическом соединении (рисунки В.1-В.30). Неровности границ сферических поверхностей обусловлены автоматизированным алгоритмом измерения на КИМ, при котором щуп в процессе сканирования соскальзывал по сферической поверхности для обеспечения безотрывного обкатывания измеряемой поверхности. В результате потерянные данные измерения составили не более 5% от общего количества.

Проведенный анализ карт распределения пятен контакта в сферическом соединении для проведенных стратегий обработки позволил установить следующее.

Для первой стратегии была установлена тенденция по изменению пятна контакта со следующими особенностями. На сферических поверхностях деталей шарнира образовалось несколько кольцевых поясов, свидетельствующих о локальном истирании материала. Для крышки и шарового пальца произошло ухудшение формы сферических поверхностей (рисунки В.1-В.2, В.5-В.6), средние радиусы при учете погрешности измерения не изменились. У подпятника произошло малозаметное увеличение площади пятна контакта с перераспределением его в кольцевой пояс (рисунки В.3-В.4), средний радиус незначительно уменьшился. В целом явного съема припуска с поверхностей практически не произошло, что частично подтверждает ранее сформулированный тезис. При сравнении карт съема припуска с картами пройденных путей сегментами сферических поверхностей деталей шарнира для данной стратегии (рисунки А.1-А.2) было установлено, что форма пятна контакта начала трансформироваться в горизонтальный кольцевой пояс. При этом наблюдается явно выраженное смещение пятен контакта от экваториальной зоны в стороны полюсов, что подтверждает представления о физической сущности процесса ВСП, изложенной в разделе 3.2.4.

Для второй стратегии обработки была установлена тенденция по изменению пятна контакта со следующими особенностями. Явный съем припуска слабо заметен. Значительное изменение среднего радиуса подпятника по большей части связано с соскальзыванием щупа при измерении после притирки. На сферических поверхностях деталей образовались кольцевые риски, свидетельствующие о постоянстве ориентации результирующего вектора скорости вращения. Для крышки произошло уменьшение пятна контакта с нарушением его сплошности (рисунки В.7-В.8). Вместо единого пояса контакта

образовалось два локальных противоположных по меридиану пятна. Для подпятника произошло похожее изменение формы пятна контакта (рисунки В.9-В.10) с разрывом пояса. В целом качество сферического соединения ухудшилось. При сравнении карт съема припуска с картами пройденных путей сегментами сферических поверхностей деталей шарнира (рисунки А.3-А.4) было установлено, что образованные формы пятен контакта деталей имеют вытянутость, стремящуюся по форме к границам максимальных пройденных путей, что дополнительно свидетельствует о сохранении значимости кинематического фактора для ВСП на всех стадиях процесса обработки.

Для третьей стратегии обработки была установлена позитивная тенденция по изменению пятна контакта со следующими особенностями. Явный съем припуска со сферических поверхностей был установлен по результатам измерений, а сами поверхности получили матовый оттенок. У детали «Крышка» произошло расширение пятна контакта в направлении экваториальной части с выравниванием нижней границы, а само пятно сохранило форму пояса (рисунки В.13-В.14). Для детали «Подпятник» произошло расширение пояса контакта с искривлением верхней границы (рисунки В.15-В.16), а значение радиальных зазоров на большей части поверхности контакта не превышали допустимого отклонения от сферичности. Для шарового пальца наблюдался общий прирост пятна контакта с формированием нового пояса контакта в верхней полусфере (рисунки В.17-В.18). В целом качество сферического соединения улучшилось. При сравнении карт съема припуска с картами пройденных путей сегментами сферических поверхностей (рисунки А.5-А.6) деталей шарнира было установлено, что поскольку в данной стратегии присутствует накопление путей в околополюсной зоне порядка 22% от максимального значения, то происходит более равномерный и повышенный съем припуска на этих участках.

Для четвертой стратегии обработки была установлена тенденция по изменению пятна контакта со следующими особенностями. Явный съем припуска произошел на всех деталях (таблицы 4.4-4.5). Для крышки произошло увеличение пятна контакта (рисунки В.19-В.20) на 15,0%. Для подпятника средний радиус изменился незначительно в силу наличия участков с повышенным зазором, в которых не происходило съема припуска (рисунки В.21-В.22). Для шарового пальца произошло увеличение отклонения от сферичности с выравниванием геометрии пятна контакта по горизонту (рисунки В.23-В.24). Общее пятно контакта в соединении незначительно увеличилось при ухудшении формы сферической поверхности подпятника. При сравнении карт съема припуска с картами пройденных путей сегментами сферических поверхностей деталей шарнира (рисунки А.7-А.8) было установлено, что возникшая синусоидальность нижней границы

пятна контакта крышки имеет схожесть с границами увеличенного значения накопленных путей для данной стратегии обработки. Также смещение вниз верхней границы пятна контакта на подпятнике может объясняться образованием участка с увеличенного значения накопленных путей в области полюса, что в сочетании с фактором повышенного давления интенсифицирует притирку в данной области.

Для пятой стратегии обработки была установлена тенденция по изменению пятна контакта со следующими особенностями. Явный съем припуска произошел на всех деталях. Для крышки произошло увеличение пятна контакта на 34,0%, при этом нижняя граница пятна выровнялась по горизонту (рисунки В.25-В.26). Для подпятника произошло увеличение пятна контакта на 54,7%, однако, граница пятна получила более выраженную синусоидальную форму (рисунки В.27-В.28). Для шарового пальца произошло выравнивание формы пятна контакта (рисунки В.29-В.30). В целом для соединения общее пятно контакта увеличилось на 42,5%. При сравнении карт съема припуска с картами пройденных путей сегментами сферических поверхностей деталей шарнира (рисунки А.9-А.10) было установлено, что для данной стратегии происходит более плавное всестороннее разрастание пятна контакта за счет более сбалансированного сочетания факторов давления и скорости по контактной поверхности. В результате пятно контакта подпятника разрослось как в направлении полюса, так и экватора с замыкание пояса пятна контакта.

Подводя итог вышеизложенному, следует отметить, что кинематические факторы процесса ВСП и фактическая форма сферических поверхностей деталей шарового шарнира в начале обработки имеют устойчивую связь с характером съема припуска с контактными сферических поверхностей и образующимся пятном контакта в соединении, которое определяет геометрическую точность обрабатываемого изделия со сферическим соединением деталей. Полученные результаты подтверждают предварительно сформулированную гипотезу. Результаты анализа карт распределения пятна контакта в сферическом соединении демонстрируют, что локализация съема припуска образуется на участках увеличенных пройденных путей элементарными сегментами сферических поверхностей деталей шарового шарнира. При этом сохранение интенсивности съема припуска в процессе ВСП становится возможным только при периодической смене направления результирующего вектора скорости. Таким образом, полученные результаты подтверждают ранее выдвинутый тезис о влиянии кинематического фактора на коэффициент Престона. 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, что соответствует представлению о физической сущности протекания процесса ВСП изложенном в разделе 3.2.4. Данная стратегия позволяет получить наиболее полное перекрытие обрабатываемых поверхностей и обеспечивает сбалансированное сочетание факторов процесса ВСП.

4.3 Апробация имитационной модели притирки

После предварительной обработки экспериментальных данных производилась процедура апробации имитационной модели процесса ВСП, подробное описание которой изложено во 2 главе [102].

Апробация имитационной модели заключалась в определении значений коэффициента Престона и сравнении результатов моделирования с экспериментальными данными. Процедура апробации состояла из следующих этапов:

1. Моделирование опытов при значении коэффициента Престона, взятого из данных литературных источников.
2. Построение карт съема припуска с поверхности по результатам моделирования и физического эксперимента.
3. Сравнение значение локальных величин съема припуска и корректировка значения коэффициента Престона с использованием метода бинарного поиска.
4. Повторение пунктов 1-3 до получения подобия в характере распределения съема припуска в пределах 90%.

При выполнении апробации потребовалось произвести цикл приближения из 15 итераций. По окончании первой итерации сходимость результатов моделирования с экспериментальными результатами измерения после притирки составляла 71,2%.

Данные результатов имитационного моделирования на различных стадиях процесса притирки шаровых шарниров представлены в сводных таблицах В.1–В.6. Анализ полученных результатов моделирования по каждому опыту позволил установить следующие особенности.

В первом опыте наблюдается слабая динамика съема припуска с контактных сферических поверхностей. Форма и количество пятен контакта сохраняются на протяжении всего процесса моделирования опыта. У крышки наблюдается постепенное увеличение площади пятна контакта путем расширения ширины пятна (рисунок В.31). При этом наблюдается рост отклонения от сферичности. У подпятника наблюдается переменный характер изменения пятна контакта (рисунок В.32). Сначала происходит

плавное уменьшение. К концу опыта происходит резкое увеличение пятна контакта с получением максимального значения в пределах опыта. У шарового пальца состояние пятна контакта также носит переменный характер, однако, значения колебаний значительно меньше, чем у подпятника, и составляют всего несколько процентов (рисунок В.33). Полученные результаты моделирования по первому опыту имеют следующие значения критериев сходимости с экспериментальными результатами измерения на КИМ после притирки: средний радиус соединения – 99,94%; отклонение от сферичности – 84,30%; относительная площадь пятна контакта – 86,47%; топология пятна контакта – 90,82%; форма пятна контакта – 79,10%; расположение пятна контакта – 96,06%. При этом общая сходимость данных моделирования с экспериментальными при равных весовых значениях критериев составила 89,45%.

Во втором опыте наблюдается более выраженная динамика съема припуска с контактных сферических поверхностей. Форма и количество пятен контакта меняется на протяжении всего процесса моделирования опыта. У крышки сначала наблюдается постепенное уменьшение площади пятна контакта с образованием двух локальных участков (рисунок В.34). К концу опыта повышается локальная притертость одного пятна и общая площадь контакта вырастает. Отклонение от сферичности увеличивается на протяжении всего опыта. У подпятника сначала происходит разрыв сплошности пятна контакта с образованием двух зон (рисунок В.35). В дальнейшем количество зон увеличивается и само пятно начинает постепенно перемещаться в наклонное положение. Площадь пятна контакта меняется по синусоидальному закону, к концу опыта достигая сопоставимых значений с исходными данными. Отклонение от сферичности сначала плавно снижается, достигая своего минимального значения, после чего происходит ускоренный рост ближе к концу опыта. У шарового пальца наблюдается перераспределение пятна контакта с образованием новых и частичной утратой первичных пятен на протяжении всего опыта (рисунок В.36). Площадь пятна контакта меняется по синусоидальному закону и к концу моделирования опыта незначительно возрастает относительно исходного значения. Отклонение от сферичности на протяжении продолжительного времени моделирования снижается и ближе к концу начинает расти. Полученные результаты моделирования по второму опыту имеют следующие значения критериев сходимости с экспериментальными результатами измерения на КИМ после притирки: средний радиус соединения – 99,96%; отклонение от сферичности – 78,97%; относительная площадь пятна контакта – 94,20%; топология пятна контакта – 85,69%; форма пятна контакта – 87,47%; расположение пятна контакта – 93,03%. При этом общая

сходимость данных моделирования с экспериментальными при равных весовых значениях критериев составила 89,89%.

В третьем опыте наблюдается явно выраженная динамика съема припуска с контактных сферических поверхностей. Форма и количество пятен контакта меняется на протяжении всего процесса моделирования опыта. У крышки сначала наблюдается резкое уменьшение площади пятна контакта с локализацией его у отверстия (рисунок В.37). Далее начинается постепенный рост пятна контакта вплоть до конца опыта. Отклонение от сферичности сначала увеличивается до верхнего предела, после чего начинает снижаться. У подпятника происходит постепенный разрыв сплошности пятна контакта с образованием двух поясов, которые к концу опыта сливаются в единое кольцо, имеющее незначительный наклон относительно оси детали (рисунок В.38). Площадь пятна контакта незначительно меняется по синусоидальному закону и к концу опыта достигает меньшего значения по сравнению с исходными данными. Отклонение от сферичности поначалу плавно снижается, достигая своего минимального значения, после чего происходит плавный рост ближе к концу опыта. У шарового пальца наблюдается перераспределение пятна контакта с образованием новых и частичной утратой первичных пятен на протяжении всего опыта (рисунок В.39). Площадь пятна контакта меняется по синусоидальному закону и к концу моделирования опыта возрастает относительно исходного значения на 5,3%. Отклонение от сферичности на протяжении всего опыта плавно растет. Полученные результаты моделирования по третьему опыту имеют следующие значения критериев сходимости с экспериментальными результатами измерения на КИМ после притирки: средний радиус соединения – 99,98%; отклонение от сферичности – 88,47%; относительная площадь пятна контакта – 92,07%; топология пятна контакта – 86,29%; форма пятна контакта – 84,81%; расположение пятна контакта – 90,89%. При этом общая сходимость данных моделирования с экспериментальными при равных весовых значениях критериев составила 89,94%.

В четвертом опыте наблюдается явно выраженная динамика съема припуска с контактных сферических поверхностей. Форма и количество пятен контакта меняется на протяжении всего процесса моделирования опыта. У крышки сначала наблюдается разделение пятна контакта на два кольцевых пояса, которые к концу опыта снова сливаются в единое пятно (рисунок В.40). При этом площадь пятна контакта меняется по синусоидальному закону с уменьшением по отношению к исходному значению на 8,2%. Отклонение от сферичности плавно растет на протяжении всего промежутка моделирования. У подпятника происходит незначительное изменение формы границы пятна контакта с сохранением его расположения (рисунок В.41). К концу опыта

происходит зарождение зоны разделения пятна контакта на два кольцевых пояса. Площадь пятна контакта меняется нелинейно и к концу опыта достигает значения на 2,4% больше, чем у исходного значения. Отклонение от сферичности плавно увеличивается на протяжении всего опыта. У шарового пальца наблюдается перераспределение пятна контакта с образованием множества новых локальных пятен из первичных на протяжении всего опыта (рисунок В.42). Площадь пятна контакта меняется по синусоидальному закону и к концу моделирования опыта снижается относительно исходного значения на 0,6%. Отклонение от сферичности на протяжении всего опыта плавно растет. Полученные результаты моделирования по четвертому опыту имеют следующие значения критериев сходимости с экспериментальными результатами измерения на КИМ после притирки: средний радиус соединения – 99,91%; отклонение от сферичности – 83,30%; относительная площадь пятна контакта – 93,60%; топология пятна контакта – 93,09%; форма пятна контакта – 90,25%; расположение пятна контакта – 93,43%. При этом общая сходимость данных моделирования с экспериментальными при равных весовых значениях критериев составила 92,26%.

В пятом опыте наблюдается явно выраженная динамика съема припуска с контактных сферических поверхностей. Форма и количество пятен контакта меняется на протяжении всего процесса моделирования опыта. У крышки сначала наблюдается изменение формы границы пятна контакта (рисунок В.43). Ближе к концу опыта, внутри пятна появляется участок с отсутствием контакта, который по завершению моделирования исчезает, с образованием единого пятна. При этом площадь пятна контакта меняется по нелинейному закону с увеличением к концу опыта на 44,6% по отношению к исходному значению. Отклонение от сферичности сначала медленно растет, достигая насыщения, после чего начинает стремительно снижаться. У подпятника происходит незначительное изменение формы границы пятна контакта с сохранением его расположения (рисунок В.44). Само пятно сохраняет общую форму кольцевого пояса. Площадь пятна контакта нелинейно вырастает и к концу опыта достигает значения на 45,5% больше, чем у исходного. Отклонение от сферичности сначала плавно снижается, а к концу опыта начинает резко увеличиваться. У шарового пальца наблюдается перераспределение пятна контакта со сливанием групп отдельных пятен в более крупные одиночные пятна (рисунок В.45). К концу моделирования образованные крупные пятна исчезают, а кольцевые пояса начинают дробиться на мелкие пятна. Площадь пятна контакта монотонно снижается на протяжении большей части опыта, а к концу начинает стремительно расти и достигает значения 27,8%. Отклонение от сферичности незначительно меняется по синусоидальному закону. Полученные результаты

моделирования по пятому опыту имеют следующие значения критериев сходимости с экспериментальными результатами измерения на КИМ после притирки: средний радиус соединения – 99,86%; отклонение от сферичности – 83,83%; относительная площадь пятна контакта – 96,37%; топология пятна контакта – 87,97%; форма пятна контакта – 86,70%; расположение пятна контакта – 88,34%. При этом общая сходимость данных моделирования с экспериментальными при равных весовых значениях критериев составила 90,51%.

Представленные результаты имитационного моделирования ВСП демонстрируют, что для большинства рассмотренных стратегий лучшие значения параметров качества сферического соединения получались на промежуточных стадиях процесса обработки. При этом для большинства деталей наблюдалась нелинейность изменения значений основных параметров сферического соединения и пятна контакта по мере протекания процесса моделирования. Полученные результаты хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований и имеют среднюю общую сходимость 90,31%.

Таким образом, можно сделать заключение, что разработанный АПК информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования процесса ВСП демонстрирует адекватность прогнозируемых результатов и может быть применен для поиска рациональных стратегий обработки изделий со сферическим соединением. Использование разработанного АПК в совокупности с созданным сферопритирочным стендом позволяет подобрать рациональную стратегию обработки для шарового шарнира и реализовать ее на практике, что в целом повышает управляемость процессом ВСП. Практическая апробация имитационной модели в производственных условиях показала повышение производительности на ВСП на 8-15% по сравнению с действующей технологией (приложение Д).

4.4 Формирование рекомендаций по поиску рациональных стратегий обработки сферических поверхностей в процессе взаимной сферической притирки

На основании проведенных опытов можно сформировать следующие рекомендации для производства при изготовлении шаровых шарниров.

При назначении кинематических режимов обработки следует отдавать предпочтение таким стратегиям, которые обеспечивают концентрацию максимальных пройденных путей в участках сферических поверхностей, имеющих выпуклости. Вследствие чего на этих участках возникает повышенный съём припуска и отклонение формы поверхности снижается.

Поскольку было установлено наличие влияния кинематических факторов на коэффициент Престона, то для интенсификации локального съема припуска необходимо обеспечивать периодическое изменение ориентации результирующего вектора скорости, для обеспечения обновления абразивной смеси в зоне притирки.

При изготовлении заготовок деталей шарового шарнира следует предусмотреть изменение формы контактных сферических поверхностей со следующими особенностями [103]:

1. Сферические поверхности деталей «Крышка» и «Подпятник» преобразовать в эллипсоиды с расстоянием между фокусами равным 50 мкм. При этом фокусы эллипсоида расположить вдоль оси вращения, а центр сместить от торца наружу на 10 мкм. Наибольший диаметр эллипсоида установить равным 20 мм.

2. Сферическую поверхность детали «Палец шаровой» преобразовать в эллипсоид с расстоянием между фокусами равным 50 мкм. Фокусы расположить перпендикулярно оси вращения. Наименьший диаметр установить равным 20 мм.

Представленные рекомендации могут лечь в основу разработки новых технологических процессов изготовления шаровых шарниров в части процесса ВСП.

4.5 Выводы по четвертой главе

1. Разработана методика обработки результатов практических измерений геометрических характеристик деталей шарового шарнира и полученных расчетных значений имитационного моделирования, позволяющая анализировать состояние пятна контакта в сферическом соединении. Полученные карты распределения пятна контакта позволяют оценить качество сферического соединения.

2. 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.

3. Были определены характеры съема припуска со сферических поверхностей деталей шаровых шарниров при различных стратегиях обработки. При этом установлено, что локализация съема припуска с образованием пятен контакта коррелирует с

расположением участков увеличенного пройденного пути, полученных при предварительном моделировании кинематики стратегии обработки. Полученные результаты легли в основу сформированных рекомендаций для машиностроительных производств.

4. Показано, что 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.

5. Апробация имитационной модели позволила установить характер поведения пятна контакта в сферическом соединении на протяжении реализации процесса ВСП. Было установлено, что для проведенных опытов наилучшие значения параметров качества сферического соединения достигались на промежуточных стадиях процесса обработки. 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. Таким образом, использование разработанного АПК для подбора рациональных стратегий обработки изделий со сферическим соединением позволяет повысить управляемость процессом ВСП. Апробация модели в производственных условиях позволила повысить производительность ВСП на 8-15%, что повышает эффективность существующей технологии.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА В СФЕРИЧЕСКОМ СОЕДИНЕНИИ В ПРОЦЕССЕ ВЗАИМНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ПРИТИРКИ

Необходимость регулярного проведения контроля качества изделия в промежутках между технологическими переходами является одной из трудностей применения метода притирки [1, 7]. Так, при изготовлении высокоточных изделий, время, затрачиваемое на проведение промежуточных измерений, может достигать до 50% времени технологического процесса [2-3, 9, 53]. Таким образом, повышение эффективности процесса ВСП за счет введения автоматического мониторинга качества изделия является актуальной задачей.

Основой мониторинга рабочего процесса является наличие физического явления с изменяющимися параметрами. В процессе ВСП происходит непрерывное приращение пятна контакта в соединении в силу наличия съема припуска с поверхностей. Происходящее явление сказывается на плотности силового замыкания между деталями и особенностями распределения механической энергии [104-105]. Поскольку характер распределения механической энергии сказывается на вибрациях, образующихся в зоне притирки, то было выдвинуто предположение о возможности реализации косвенного контроля качества сферического соединения по характеру изменения параметров ВА сигнала, аналогично мониторингу процесса шлифования [106-107].

Для установления особенностей ВА сигнала в процессе притирки необходимо было произвести измерения вибраций при различных условиях трения в сферическом соединении, а также на разных стадиях притертости шарового шарнира.

5.1 Планирование эксперимента

Планирование и проведение предварительной серии опытов по исследованию параметров ВА сигнала при различных условиях трения в сферическом соединении производилось до экспериментальных исследований процесса притирки.

Планирование и проведение эксперимента по исследованию параметров ВА сигнала в процессе ВСП происходило параллельно с экспериментом по исследованию съема припуска с контактных сферических поверхностей, представленном в главе 4.

5.1.1 Установление цели эксперимента

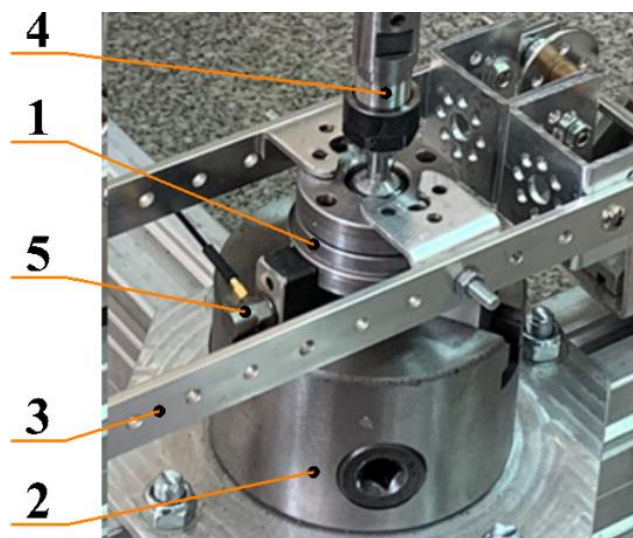
После проведенного анализа научно-технической литературы о характере ВА сигнала для условий абразивной обработки было установлено, что неровности поверхности детали при повышении плотности контакта переходят в состояние, близкое к всестороннему сжатию, что мешает образовываться хрупким трещинам, и импульсы ВА сигнала АЭ становятся более длительными [108-109].

Объектом выполненного исследования являлся процесс ВСП. В качестве предмета исследования были выбраны характеристики сигнала АЭ в процессе ВСП. Цель экспериментального исследования заключалась в установлении связей между особенностями изменения параметров сигнала АЭ процесса ВСП со степенью притертости изделий со сферическим соединением.

Вид эксперимента – физический исследовательский, количественный. Вид испытаний был определен как нормальный в лабораторных условиях.

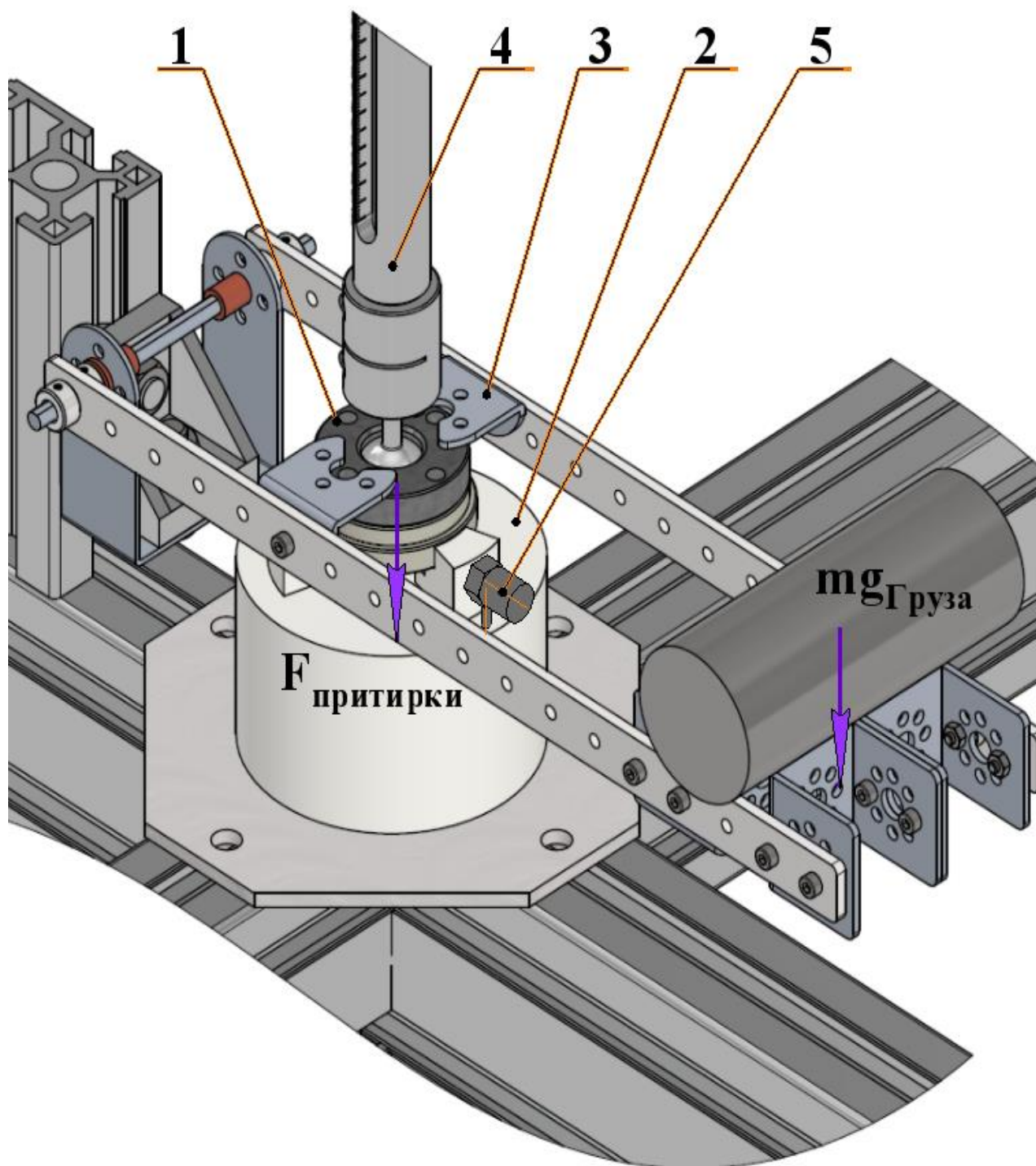
5.1.2 Условия проведения эксперимента

Акселерометр закреплялся с помощью суперклея на приспособлении (трехкулачковый патрон), на котором устанавливался шаровой шарнир. После установки шарнира опускалась рычажная система оказания давления на крышку и весь шарнир. Затем подсоединялась система главных движений станда к шаровому пальцу (рисунок 5.1). Принцип работы системы оказания давления продемонстрирован на рисунке 5.2.



1 – шаровой шарнир; 2 – трехкулачковый патрон; 3 – система создания давления;
4 – системы главных движений; 5 – акселерометр

Рисунок 5.1 — Установка сферического шарнира на стенд



- 1 – шаровой шарнир; 2 – трехкулачковый патрон; 3 – система создания давления;
4 – системы главных движений; 5 – акселерометр

Рисунок 5.2 – Схема системы создания давления

При проведении эксперимента в лаборатории и соседних помещениях не допускалось проведение шумовых и механических работ, оказывающих влияние на измерительную аппаратуру, для минимизации случайных погрешностей измерений. Экспериментальный стенд был установлен на виброгасящие роликовые опоры. Все измерения выполнялись на поверенной ВА аппаратуре.

5.1.3 Составление плана эксперимента

Измерения ВА сигнала, образующегося при различных условиях трения в сферическом соединении, проводились до процесса притирки. Условия трения в зоне контакта деталей шарнира в пределах серии опытов были следующие: сухое трение, трение со смазкой и трение с абразивной суспензией. Матрица плана эксперимента представлена в таблице 5.1.

Измерения сигнала АЭ, сопровождающего процесс притирки, производились в начале, середине и конце каждого технологического перехода. Один опыт состоял из четырех переходов. После каждого перехода производилась очистка контактных поверхностей деталей и введение новой алмазной пасты в зону притирки. План измерений представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.1 – План измерений

№ опыта	№ образца шарнира	Условия трения	Угол нутации, град	Вид сферического движения	Скорость вращения, град/сек
1	3	Сухое	0	Собственное вращение	60
2	3	Сухое	10	Собственное вращение	60
3	3	Сухое	20	Собственное вращение	60
4	3	Сухое	30	Собственное вращение	60
5	3	Сухое	30	Прецессия	60
6	3	Со смазкой	0	Собственное вращение	60
7	3	Со смазкой	10	Собственное вращение	60
8	3	Со смазкой	20	Собственное вращение	60
9	3	Со смазкой	30	Собственное вращение	60
10	3	Со смазкой	30	Прецессия	60
11	3	С абразивной суспензией	0	Собственное вращение	60
12	3	С абразивной суспензией	10	Собственное вращение	60
13	3	С абразивной суспензией	20	Собственное вращение	60
14	3	С абразивной суспензией	30	Собственное вращение	60

Завершение таблицы 5.1

15	3	С абразивной суспензией	30	Прецессия	60
16	4	Сухое	0	Собственное вращение	60
17	4	Сухое	10	Собственное вращение	60
18	4	Сухое	20	Собственное вращение	60
19	4	Сухое	30	Собственное вращение	60
20	4	Сухое	30	Прецессия	60
21	4	Со смазкой	0	Собственное вращение	60
22	4	Со смазкой	10	Собственное вращение	60
23	4	Со смазкой	20	Собственное вращение	60
24	4	Со смазкой	30	Собственное вращение	60
25	4	Со смазкой	30	Прецессия	60
26	4	С абразивной суспензией	0	Собственное вращение	60
27	4	С абразивной суспензией	10	Собственное вращение	60
28	4	С абразивной суспензией	20	Собственное вращение	60
29	4	С абразивной суспензией	30	Собственное вращение	60
30	4	С абразивной суспензией	30	Прецессия	60

Таблица 5.2 – План измерений

Условия измерения	№ измерения				
	Шарнир №1	Шарнир №2	Шарнир №3	Шарнир №4	Шарнир №5
До притирки	1	2	3	4	5
Переход 1 начало	6	18	30	42	54
Переход 1 середина	7	19	31	43	55
Переход 1 конец	8	20	32	44	56
Переход 2 начало	9	21	33	45	57
Переход 2 середина	10	22	34	46	58

Завершение таблицы 5.2

Переход 2 конец	11	23	35	47	59
Переход 3 начало	12	24	36	48	60
Переход 3 середина	13	25	37	49	61
Переход 3 конец	14	26	38	50	62
Переход 4 начало	15	27	39	51	63
Переход 4 середина	16	28	40	52	64
Переход 4 конец	17	29	41	53	65

5.1.4 Методика выполнения измерений

Измерения ВА параметров производились в соответствии со следующими нормативными документами: ГОСТ Р 59701.1-2022, ГОСТ Р ИСО 20816-1-2021, ГОСТ Р ИСО 22096-2015.

Перед проведением опытов производилась проверка измерительного оборудования на тестовом образце шарнира. После монтажа датчиков возле зоны обработки осуществлялась 30 минутная выдержка для выравнивания температуры датчиков с температурой окружающей среды.

Для проведения измерений вибраций использовался виброанализатор Type 3050-A-060 Brüel & Kjær с комплектом акселерометров Type 4393 и Type 4321 и динамометрическим молотком Type 8202/8200, описание которых представлено в разделе 2.2.2.

Методика измерений ВА параметров при различных условиях трения в сферическом соединении заключалась в следующем. Запись сигнала начиналась за 5 секунд до запуска привода станда. Запись производилась на протяжении 12 секунд, обеспечивая реализацию двух полных оборотов шарового пальца.

Методика измерений ВА сигналов на различных стадиях притертости сферического соединения заключалась в следующем. После запуска перехода рабочего процесса притирки осуществлялась выдержка по времени для окончательного перераспределения абразивной смеси в зоне обработки. Выдержка составляла 50 ± 5 секунд. Далее запускалась запись вибраций на начальной стадии обработки, которая

составляла 20 ± 5 секунд. На этой стадии абразивная смесь обладала все еще высокой режущей способностью.

Следующая запись запускалась спустя $5 \text{ минут} \pm 5 \text{ секунд}$ от начала перехода. На этой стадии рабочего процесса часть абразива утратила режущую способность.

Последняя запись в рамках перехода запускалась спустя $9 \text{ минут} \pm 5 \text{ секунд}$ от начала перехода. На этой стадии рабочего процесса абразив значительно утратил режущую способность.

Блок-схема полученной системы мониторинга изображена на рисунке 5.3.

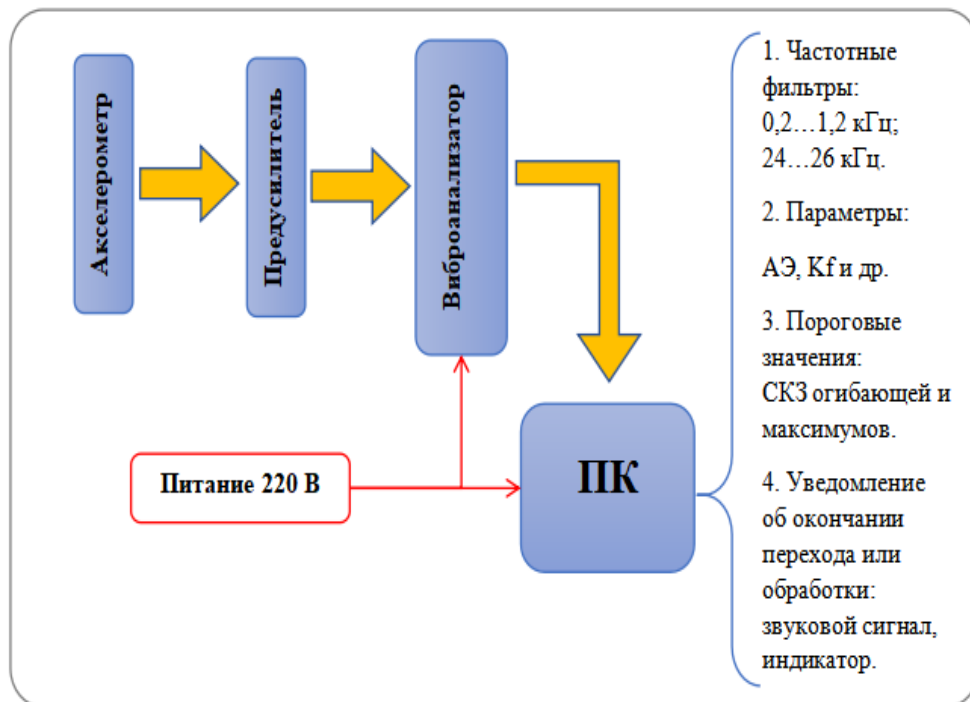


Рисунок 5.3 – Блок-схема системы мониторинга процесса притирки

Для измерения собственных частот колебаний притирочного станда акселерометр крепился на раме станда в трех точках. После закрепления датчика динамометрическим молотком наносилась серия ударов по раме станда на расстоянии примерно 20 мм от места крепления датчика. Блок-схема системы мобильной диагностики изображена на рисунке 5.4.

Измерение момента силы трения в сферическом соединении производилось с использованием цифрового динамометра. На цилиндрической ступени шарового пальца закреплялась посредством пластикового хомута кевларовая нить на расстоянии 20 мм от центра шарнира. Усилие прижима крышки шарнира равнялось усилию в процессе притирки. Условие трения при измерении момента сил соответствовали условиям трения в процессе притирки. Общая схема измерения момента силы трения в сферическом соединении приведена на рисунке 5.5.

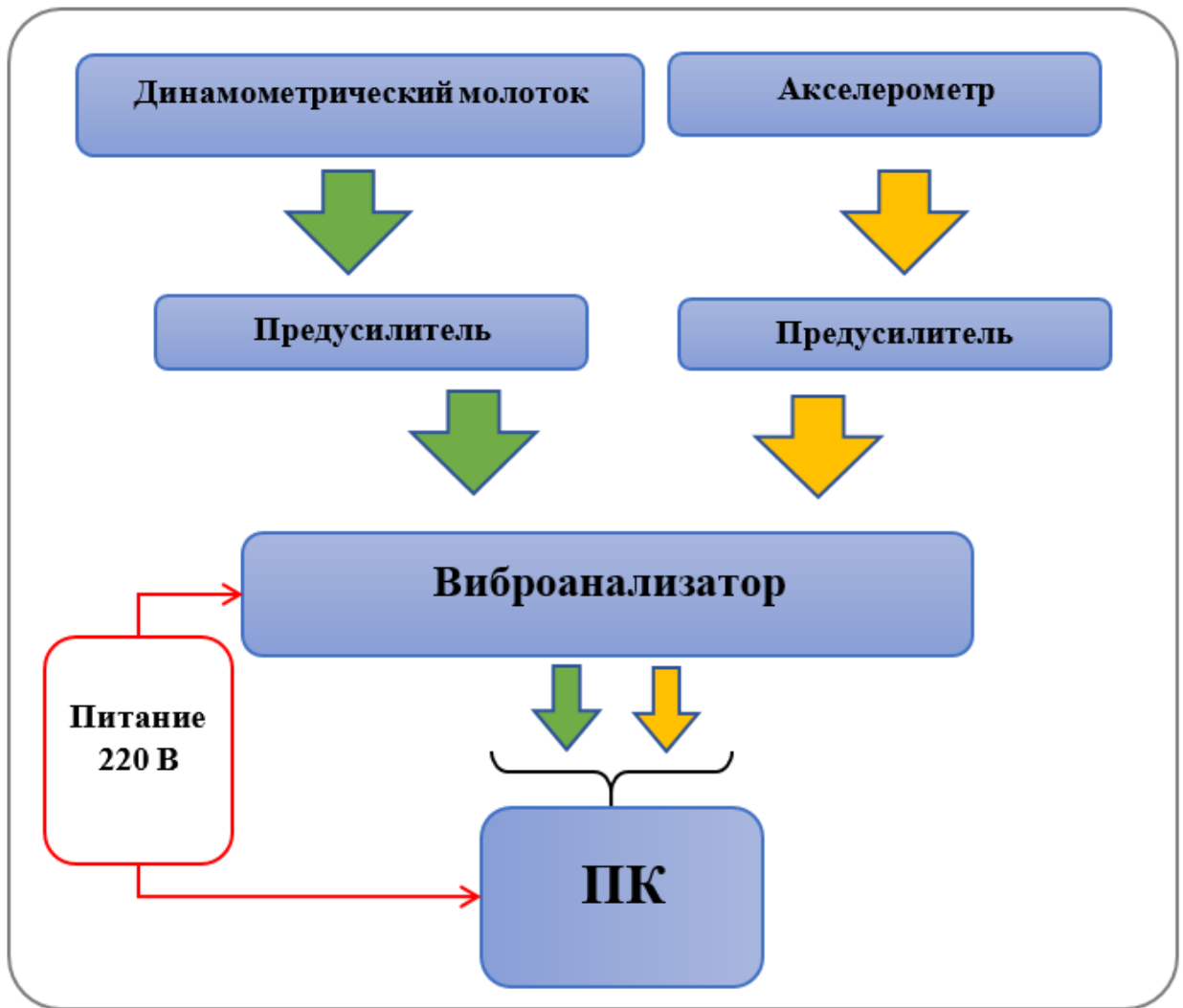
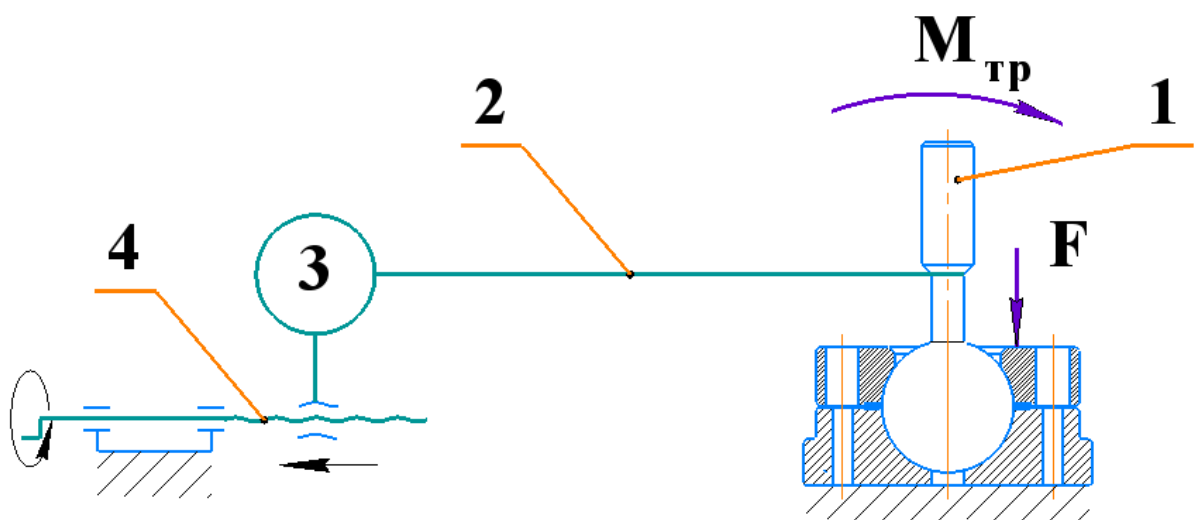


Рисунок 5.4 – Блок-схема системы мобильной диагностики



1 – Шаровой палец; 2 – Кевларовая нить; 3 – Цифровой динамометр; 4 – Механизм натяжения

Рисунок 5.5 – Схема измерения момента силы трения в сферическом шарнире

Процедура измерения проводилась в трех сечениях по следующей последовательности действий:

1. Шаровой палец переводится в начальное положение (рисунок 5.6(а)).
2. Измеряется усилие, необходимое для вращения шарового пальца в промежуточном (рисунок 5.6(б)) и конечном положении (рисунок 5.6(в)).
3. Производится переустановка шарнира путем поворота крышки и подпятника на 120 градусов.

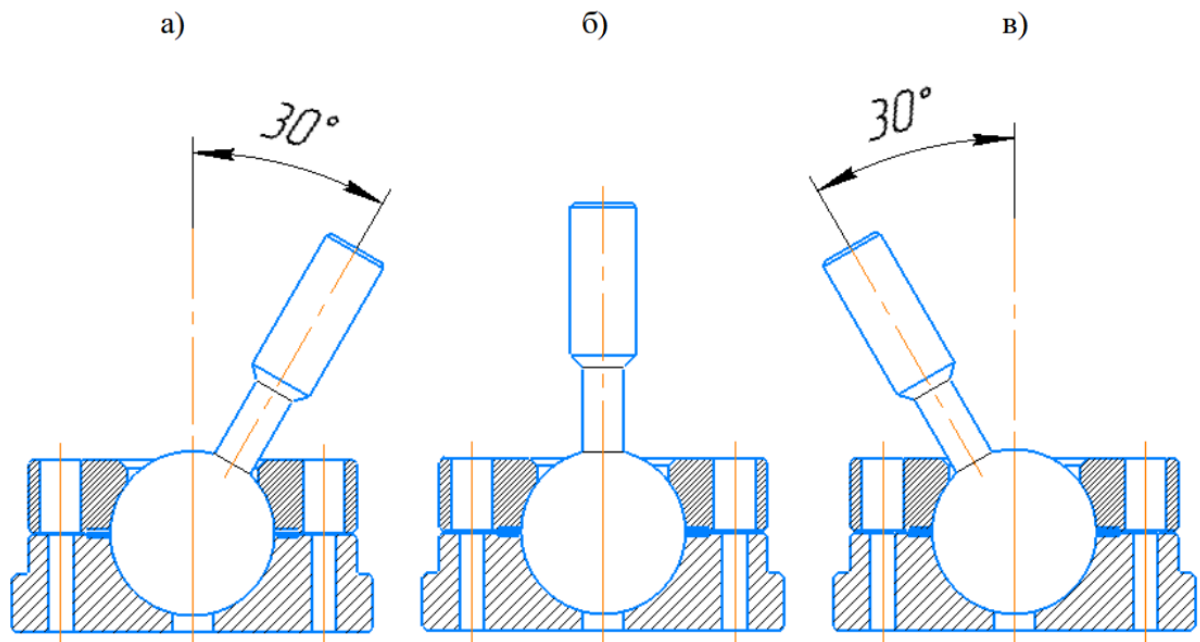


Рисунок 5.6 – Положение шарового пальца: (а) начальное; (б) промежуточное; (в) конечное

5.1.5 Методики обработки экспериментальных данных

Запись временного сигнала вибраций, его предварительная обработка и конвертация в формат WAV производилась в специализированном ПО Pulse v19.

Последующая обработка производилась в специализированном ПО, имеющем свидетельство о государственной регистрации (разработчик МГТУ «СТАНКИН»).

Первичная обработка заключалась в построении спектров частот. Затем на графиках определялись диапазоны частот, в которых наблюдалась существенное отличие в энергетических уровнях для разных стадий обработки. Эти диапазоны в последующем дополнительно рассматривались по уровням среднеквадратичных значений (далее – СКЗ).

Оценка динамического параметра сферического соединения производилась по данным, полученным с цифрового динамометра. В качестве оценочного параметра выступал динамический момент силы трения в соединении, который рассчитывался как

произведение среднего усилия, необходимого для наклона шарового пальца, на длину плеча приложения нагрузки.

5.2 Исследование виброакустических сигналов при различных условиях трения в сферическом соединении

Во всех опытах с использованием абразивной суспензии заметно кратное увеличение общего уровня энергии ВА сигнала по сравнению с условиями сухого трения или трения со смазкой. При этом между условиями сухого и масляного трения не наблюдается особой разницы в общих уровнях (рисунок 5.7).

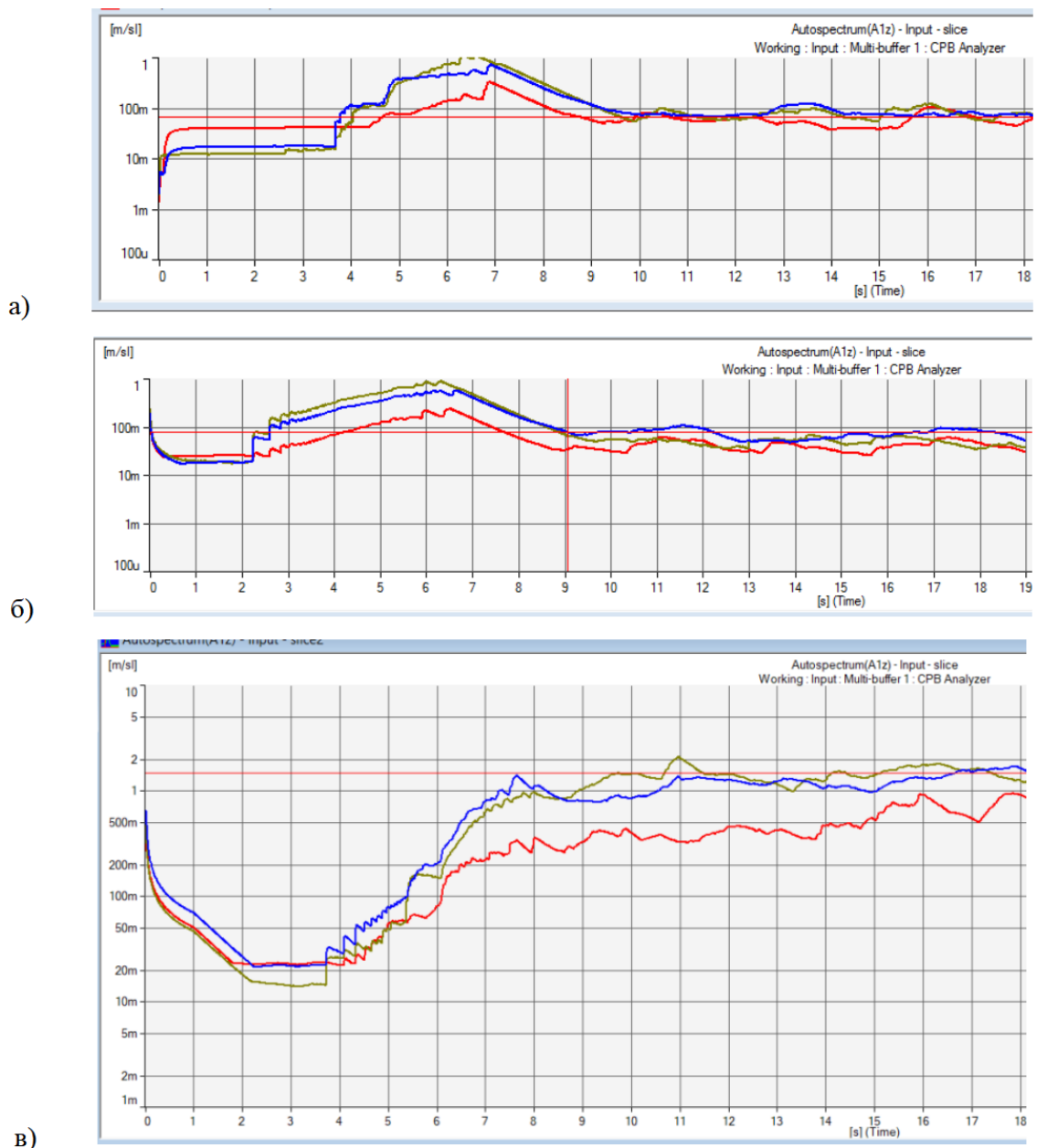


Рисунок 5.7 — Общие уровни ВА сигнала (а) для опыта №1, (б) для опыта №6, (в) для опыта №11

Для идентичных условий трения и разных образцов шарнира наблюдается различие в характере сигнала. Так, для шарнира с меньшей степенью точности сферического соединения характерны более плавные графики общих уровней, а для более точного соединения видны ярко выраженные пики и амплитуды колебания общего уровня сигнала (рисунки Г.1-Г.2). При этом среднее значение общих уровней для более точного соединения в среднем выше на 30-40% для условий сухого трения и со смазкой.

Графики спектров частот в каждом опыте для всех осей имеет схожий характер, поэтому можно рассматривались спектры только для оси X. Сначала были рассмотрены графики спектров для условия сухого трения, поскольку такое условие подразумевает наличие одного фактора без случайных составляющих процесса. Для определения интересующих диапазонов частот спектра рабочего процесса были рассмотрены графики спектров опыта 1 и помехи на всем частотном диапазоне записи (рисунок 5.8).

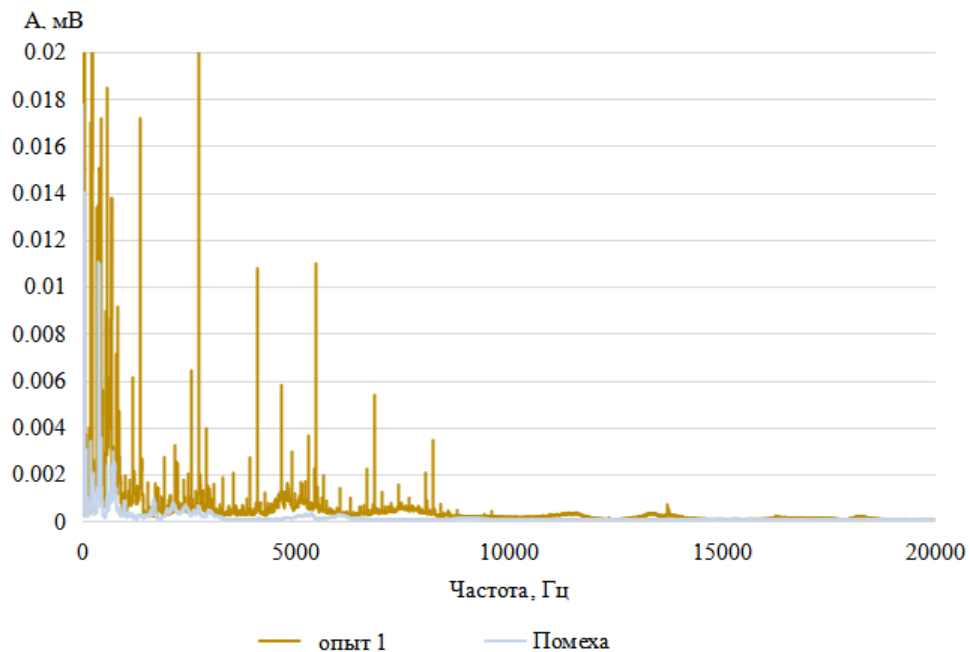


Рисунок 5.8 — Графики спектров частот

Из графиков следует, что в диапазоне частот 0 до 4 кГц вибрации определяются в основном сопутствующими механизмами. Наибольший интерес представляют спектры рабочего процесса в диапазоне от 4 до 8 кГц и от 10 до 15 кГц, так как в этих диапазонах присутствует сильное различие между графиком частот рабочего процесса и помех.

На следующем этапе были рассмотрены спектры частот рабочего процесса из опытов с 1 по 5 и с 16 по 20 для определенных выше диапазонов частот (рисунки Г.3-Г.4). Из графиков можно заметить, что для групп опытов по каждому образцу шарнира наблюдается схожий характер графиков спектров. Имеющиеся отличия скорее всего обусловлены смещением пятна контакта в соединении и изменением его формы при

наклоне шарового пальца. Для дальнейшего анализа были выбраны опыты 2, 7, 12, 17, 22 и 27.

Сперва были рассмотрены графики спектров для опытов 2, 7 и 12 (рисунок Г.5). Из представленных графиков спектров следует, что для различных условий трения наблюдается схожий характер приращения уровней спектров частот. Существенное отличие в уровнях частот составляют графики для трения с абразивом.

Далее были рассмотрены графики спектров для опытов 2, 7 и 17, 22 (рисунки Г.6). Из графиков рабочего процесса видно, что уровни частот при условии трения со смазкой снижаются по сравнению с сухим трением. В районе 11,2 – 11,5 кГц снижение значительное. Это обстоятельство объясняется особенностью протекания физического процесса трения между деталями. Введение смазки раздвигает зазор в контакте, но его стабильность может нарушаться, что вызывает удары и повышение амплитуд в области до 8,0 кГц. Однако удары при введении смазки не столь короткие, как без смазки, что исключает короткие по времени взаимодействия в паре трения, в отличие от сухого трения.

Далее были рассмотрены графики спектров для трения с абразивом (рисунок Г.7). На всем диапазоне спектров наблюдается рост уровней частот с увеличением степени притертости изделия. При этом значительный рост наблюдается на частоте 4,2 кГц, который объясняется увеличением доли абразивных зерен, находящихся в зоне контакта притираемых деталей.

Затем были рассмотрены графики СКЗ уровней частот для выделенных выше опытов. Построение СКЗ производилось по интервалу установившегося рабочего процесса для частотных диапазонов от 5 до 6 кГц и от 10 до 12 кГц. Полученные графики СКЗ представлены на рисунках Г.8-Г.13.

Из полученных данных видно, что средний уровень СКЗ в диапазоне от 5 до 6 кГц для опыта №2 составляет примерно 150 мВ, а в опыте №7 – 200 мВ. В диапазоне от 10 до 12 кГц для опыта №2 составляет примерно 50 мВ, а в опыте №7 – 40 мВ. Таким образом отношение уровней СКЗ в виде $K_{F1} = A_{5-6}/A_{10-12}$ для опыта №2 равно 3, а для опыта №7 равно 5. Следовательно отношение увеличилось в 1,67 раза. Это говорит о том, что в опыте №7 уменьшилось количество коротких импульсов. Происходящее физическое явление объясняется тем, что масло растягивает во времени процесс взаимодействия неровностей в зоне контактного взаимодействия деталей шарнира.

Схожий характер отношения уровней СКЗ имеют записи для более точного шарнира. Так уровень СКЗ в диапазоне от 5 до 6 кГц для опыта №17 составляет примерно 337 мВ, а в опыте №22 – 256 мВ. В диапазоне от 10 до 12 кГц для опыта №17 составляет

примерно 47 мВ, а в опыте №22 – 31 мВ. Таким образом отношение K_{F1} для опыта №17 равно 7,17, а для опыта №22 равно 8,25. Следовательно отношение увеличилось в 1,15 раза, что также подтверждает ранее изложенные выводы.

Также из полученных данных следует, что по мере увеличения степени притертости изделия происходит увеличение среднего значения СКЗ в диапазоне от 5 до 6 кГц, причем для сухого трения приращение уровней более значимо, чем для трения со смазкой. Происходящее явление объясняется тем, что по мере роста притертости шарнира увеличивается площадь пятна контакта в соединении, и возрастает сила трения.

Отдельно рассматривалось условие трения с абразивной суспензией на примере опытов №12 и №27. Из графиков можно наблюдать менее выраженную цикличность приращения уровней СКЗ в отличии от условий сухого трения и трения со смазкой. Объясняется это тем, что абразив постоянно перераспределяется в зазоре между деталями шарнира, а фактор распределения абразива оказывает влияние на СКЗ. Также более равномерный характер приращения уровней является показателем равномерности протекания механического процесса съема припуска, что возможно при более однородном зазоре между деталями шарнира.

5.3 Исследование виброакустических сигналов процесса притирки

Существенное приращение пятна контакта в сферическом соединении и улучшение геометрии контактных поверхностей деталей шарового шарнира наблюдалось в 3 и 5 опытах. Для детального анализа качественных и количественных изменений в параметрах ВА сигнала на разных стадиях обработки был выбран 3 опыт, так как в нем используется 2 вида сферических движения вместо 3, что снижает уровень случайной погрешности при измерениях.

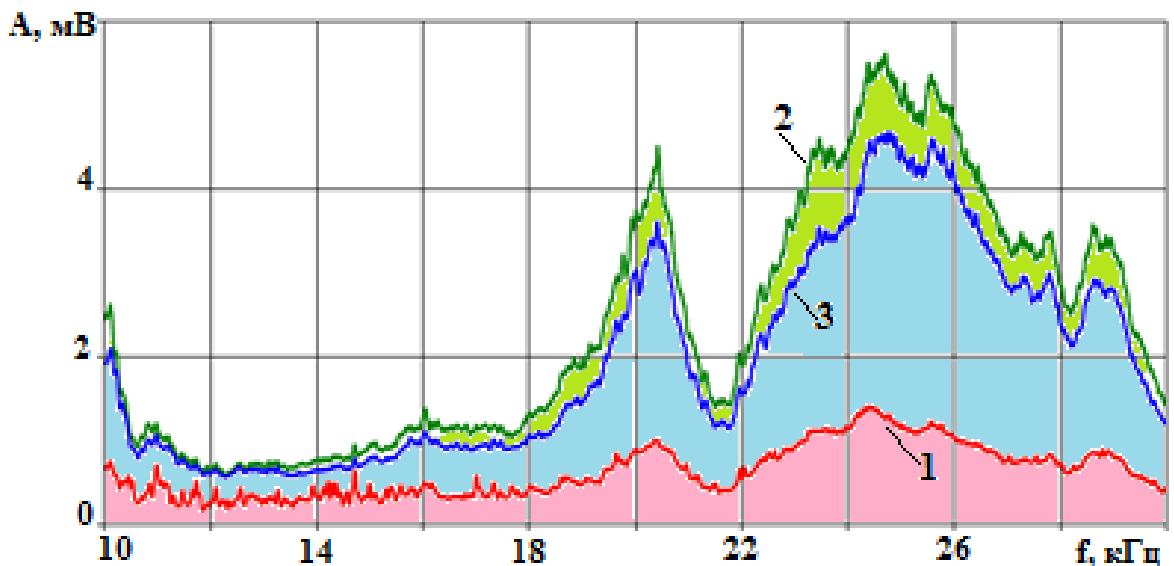
На первом этапе автоматизации процесса ВСП перед акустическим мониторингом ставятся две задачи: 1) определение момента окончания технологического перехода, когда у абразивной смеси утрачивается режущая способность и требуется ее обновление; 2) определение момента окончания процесса ВСП, когда площадь контакта притираемых поверхностей достигает требуемых размеров.

В начале исследования были измерены частоты собственных колебаний стенда для определения резонансной частоты и соответствующих гармоник (рисунок 5.9). Полученные данные свидетельствуют о том, что основная собственная частота колебаний примерно равняется 100 Гц.



Рисунок 5.9 – Спектр частот собственных колебаний

Далее были построены амплитудные спектры АЭ для поиска частотных диапазонов, где параметры сигналов АЭ наиболее чувствительны к изменению состояния рабочего процесса ВСП. На рисунке 5.10 представлены амплитудные спектры АЭ для разных моментов времени при реализации первого перехода.



1 – спектр АЭ в начале перехода после заправки узла новой абразивной смесью;

2 – спектр АЭ в середине перехода; 3 – спектр АЭ к концу перехода

Рисунок 5.10 – Амплитудные спектры АЭ для разных моментов времени на первом переходе ВСП

На рисунке 5.10 видно, что на начальной стадии процесса притирки, после заправки свежей пастой, амплитуды в данном частотном диапазоне относительно невелики. Это связано с тем, что на начальной стадии 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. При этом происходит плавный переход преимущественно к абразивному трению с более интенсивной потерей режущей способности абразива.

Для дальнейшего более подробного изучения был выделен ВЧ диапазон 24...26 кГц, где приращения амплитуды спектра наиболее заметны. Также амплитудные спектры были рассмотрены и в области низких частот (далее – НЧ), где был выделен НЧ диапазон 0,2...1,2 кГц для дальнейшего изучения. На рисунке 5.11 показаны спектры в выделенных частотных диапазонах для начала, середины и окончания первого перехода.

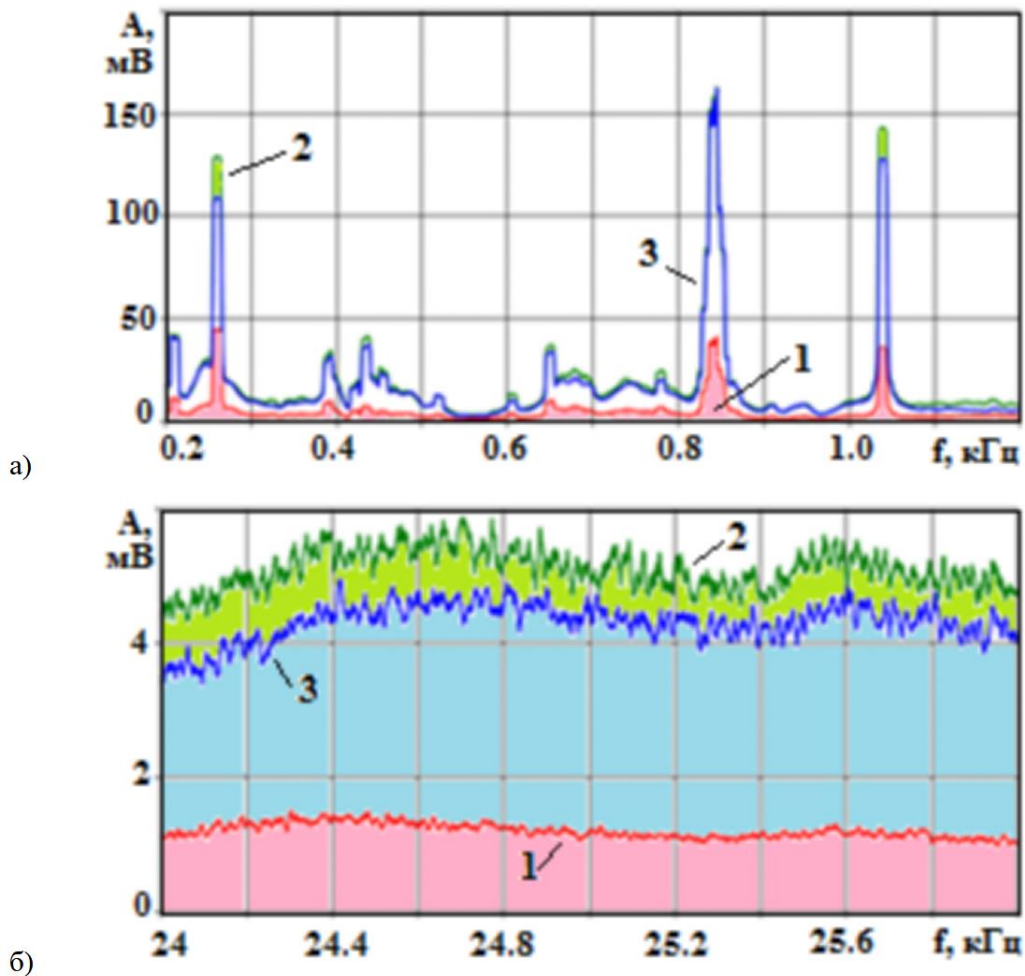


Рисунок 5.11 – Спектры в выделенных частотных диапазонах для начала 1, середины 2 и окончания 3 первого перехода: а – 0,2...1,2 кГц; б – 24...26 кГц

На рисунке 5.11 видно, что спектральные амплитуды для начала перехода значительно меньше амплитуд середины и конца перехода. Спектры для середины и конца перехода различаются гораздо меньше, но видно, что в конце перехода амплитуды становятся меньше. Это особенно заметно на ВЧ (рисунке 5.11(б)).

Графики спектров не показывают особенностей изменения амплитуды сигнала АЭ во времени, а эти особенности тоже несут информацию о состоянии объекта. На рисунке 5.12 показаны СКЗ огибающих сигналов АЭ в разных частотных диапазонах и изменения максимальных значений сигналов, фиксированных каждые 100 мс.

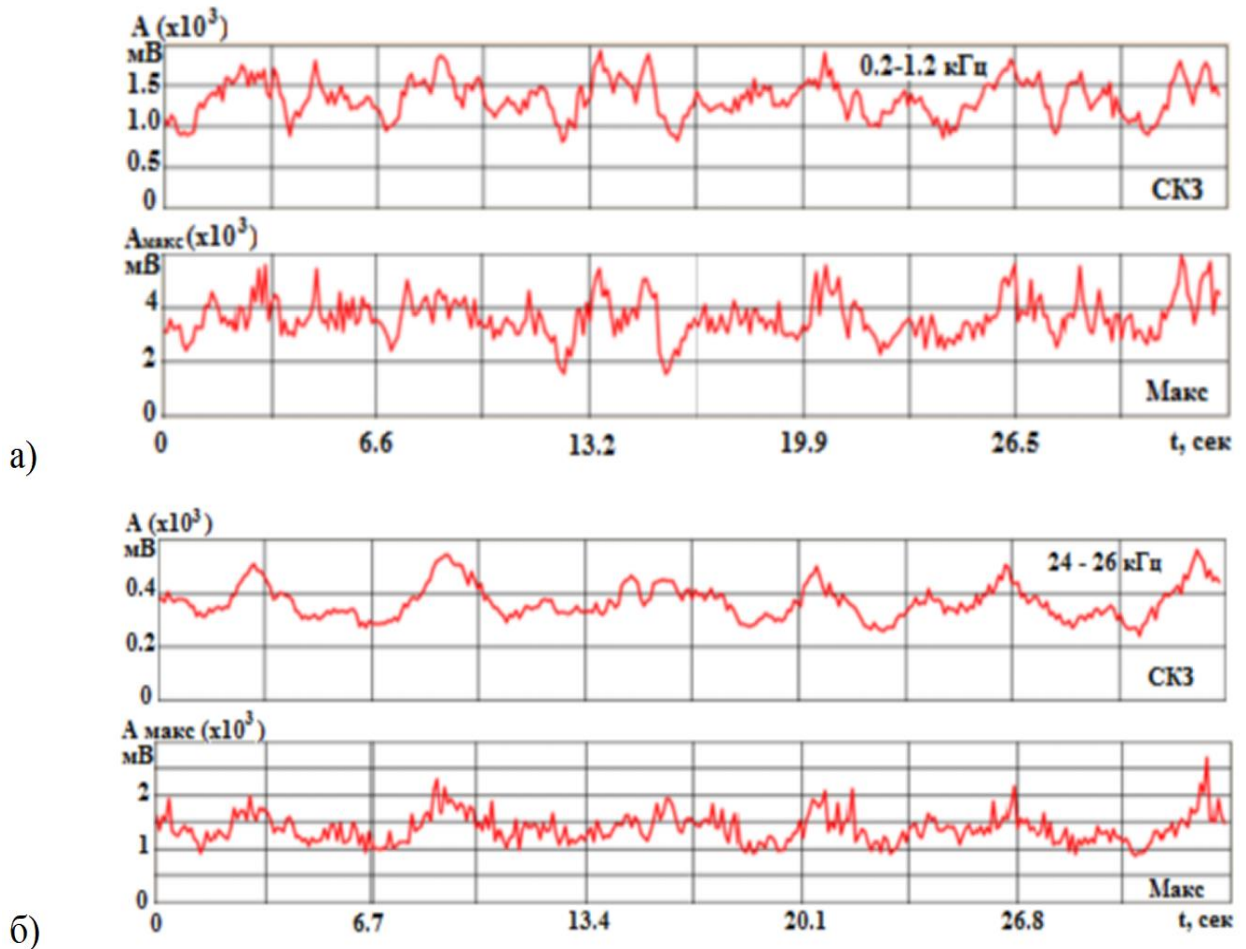


Рисунок 5.12 – Изменения СКЗ огибающей и максимальных значений сигналов АЭ в двух частотных диапазонах в конце первого перехода: а – 0,2...1,2 кГц; б – 24...26 кГц

На графиках рисунка 5.12 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 рисунке 5.13 в виде графиков собраны сведения о СКЗ и максимальных значениях амплитуд для первого и четвёртого перехода. На графиках цифры 1 и 4 означают номер перехода. Графики построены для двух частотных диапазонов, выделенных на предыдущих рисунках.

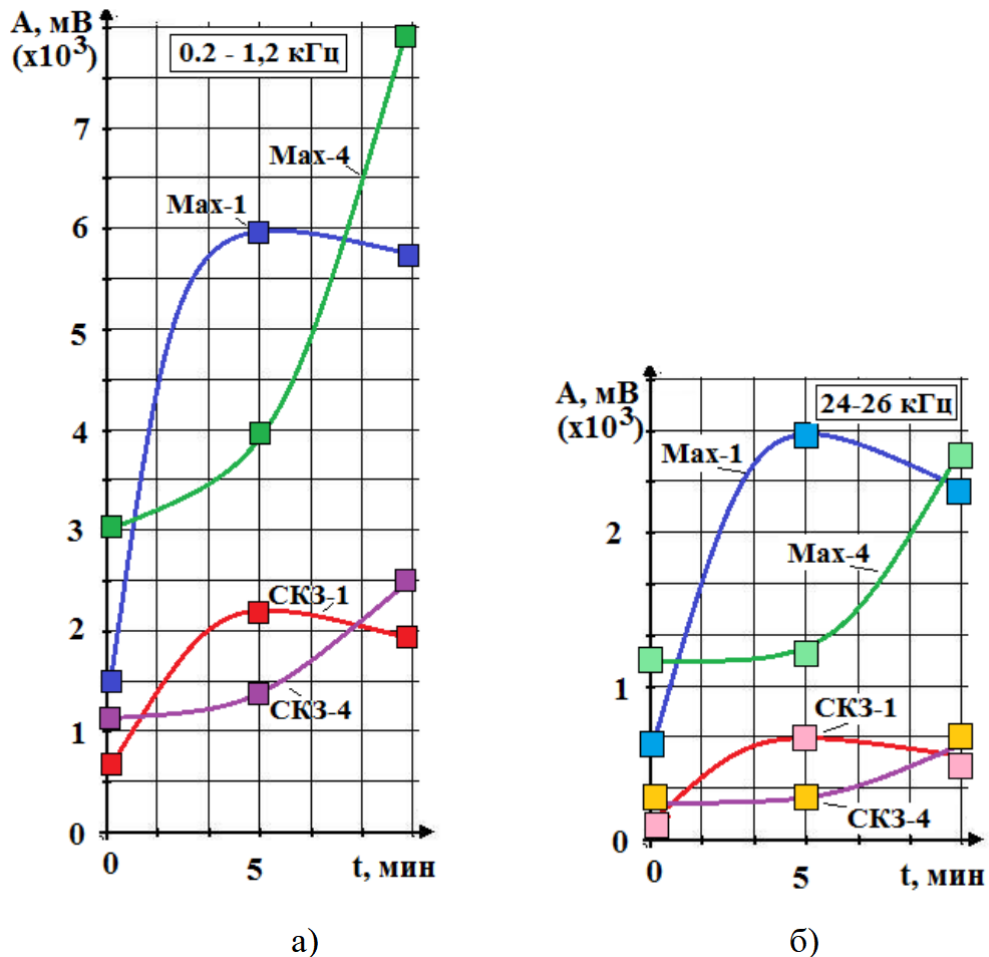


Рисунок 5.13 – Изменения СКЗ и максимальных значений амплитуд на первом и четвертом переходах в диапазонах частот: а – $0,2 \dots 1,2 \text{ кГц}$; б – $24 \dots 26 \text{ кГц}$

Анализ графиков, изображенных на рисунке 5.13, показывает, что диапазон НЧ (рисунке 5.13(а)) более динамично реагирует на окончание четвертого перехода. Максимальные амплитуды резко возрастают к концу четвертого перехода, при этом СКЗ амплитуды увеличиваются только на 25 % по сравнению с первым переходом. Диапазон ВЧ (рисунке 5.13(б)) реагирует на изменение номера и фаз переходов подобно графикам низких частот (рисунке 5.13(а)), но с меньшими приращениями. Это предопределяет предпочтения в выборе диапазона для использования в акустическом мониторинге окончания процесса ВСП. Аномальный всплеск значений СКЗ в середине первого перехода объясняется возникновением эффекта шаржирования абразивного зерна в обрабатываемую поверхность детали. В результате зерно перестает перекачиваться по притираемой поверхности и начинает вести себя как жестко установленный резец. На поверхности детали это было обнаружено благодаря кольцевым рискам, которые прорезало шаржированное абразивное зерно (рисунке 5.14). Таким образом, резкий скачок уровня СКЗ является косвенным признаком образования эффекта шаржирования абразивных зерен.

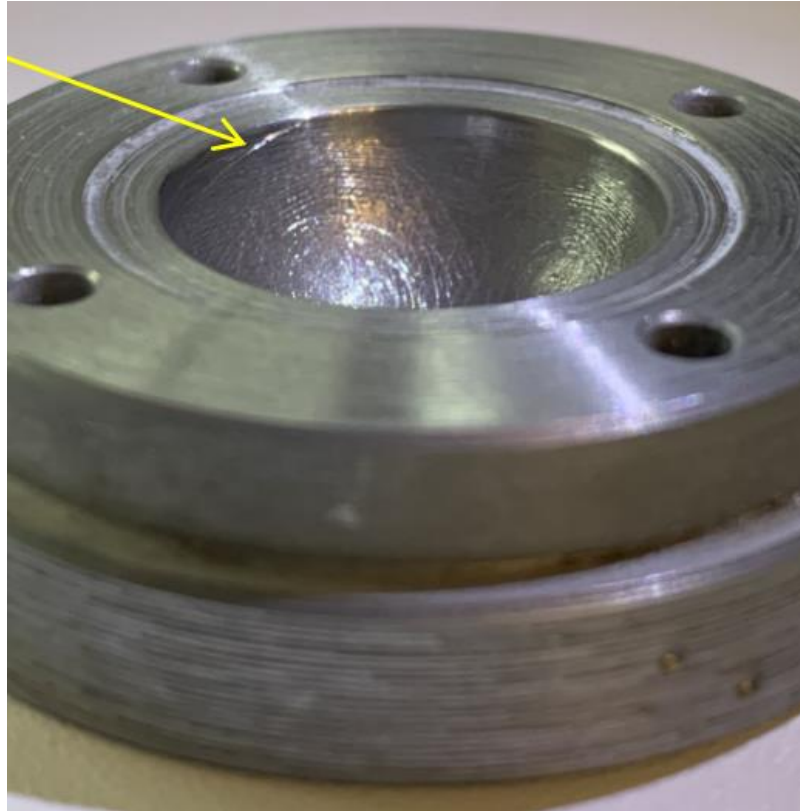


Рисунок 5.14 – Риски на сферической поверхности подпятника после притирки

Аналогичное приращение СКЗ (или максимальных значений амплитуд) было получено для 2 и 3 переходов. Разница заключается в меньшей степени приращения значений показателей, которая обусловлена меньшей суммарной притертостью изделия.

Необходимо отметить, что конструкция стенда для реализации процесса ВСП включает множество деталей, имеющих вытянутую в одном направлении форму. Это определяет наличие у конструкции множества собственных низких частот, возбуждаемых во фрикционном контакте при реализации ВСП. Эти НЧ колебания модулируют колебательные процессы во всем рассмотренном диапазоне частот, вызывая качественное подобие изменений огибающей сигналов АЭ на разных фазах переходов и при увеличении номера переходов. В таблицах 5.3 и 5.4 собраны данные о параметрах сигналов АЭ, которые включают не только сведения о максимальных значениях параметров, но и разброс значений в периоде наблюдения.

Таблица 5.3 — Изменения параметров АЭ в диапазоне 0,2...1,2 кГц

№ перехода	Фаза	Разброс АСКЗ, мВ	Разброс A_{max} , мВ
1	начало	200...600	300...1500
	середина	700...2200	2000...6000
	конец	800...2000	1800...5800
4	начало	400...1200	1000...3000
	середина	400...1400	1000...4000
	конец	800...2500	2000...8000

Таблица 5.4 — Изменения параметров АЭ в диапазоне 24...26 кГц

№ перехода	Фаза	Разброс АСКЗ, мВ	Разброс A_{\max} , мВ
1	начало	70...150	300...600
	середина	300...660	1000...2600
	конец	300...550	1000...2300
4	начало	100...290	400...1200
	середина	120...290	400...1200
	конец	200...590	600...2500

На рисунке 5.15 представлены записи сигналов АЭ в диапазонах НЧ 0,2...1,2 кГц и ВЧ 24...26 кГц в конце переходов 1 и 4. На этом же рисунке показан параметр K_{F2} , определяющий изменение текущего отношения амплитуд в диапазонах НЧ и ВЧ. В работах [105, 106] параметр K_{F2} использовался в качестве индикатора изменения плотности мощности (отношение передаваемой мощности к площади воздействия). Рост K_{F2} связан с тем, что силовые импульсы становятся более растянутыми во времени. Это приводит к тому, что в спектре АЭ энергия перераспределяется в область более низких частот. Импульсы во фрикционном контакте становятся более растянутыми из-за того, что при возникновении торможения в контакте низкая плотность мощности не позволяет быстро восстановить движение. В результате длительность импульса увеличивается.

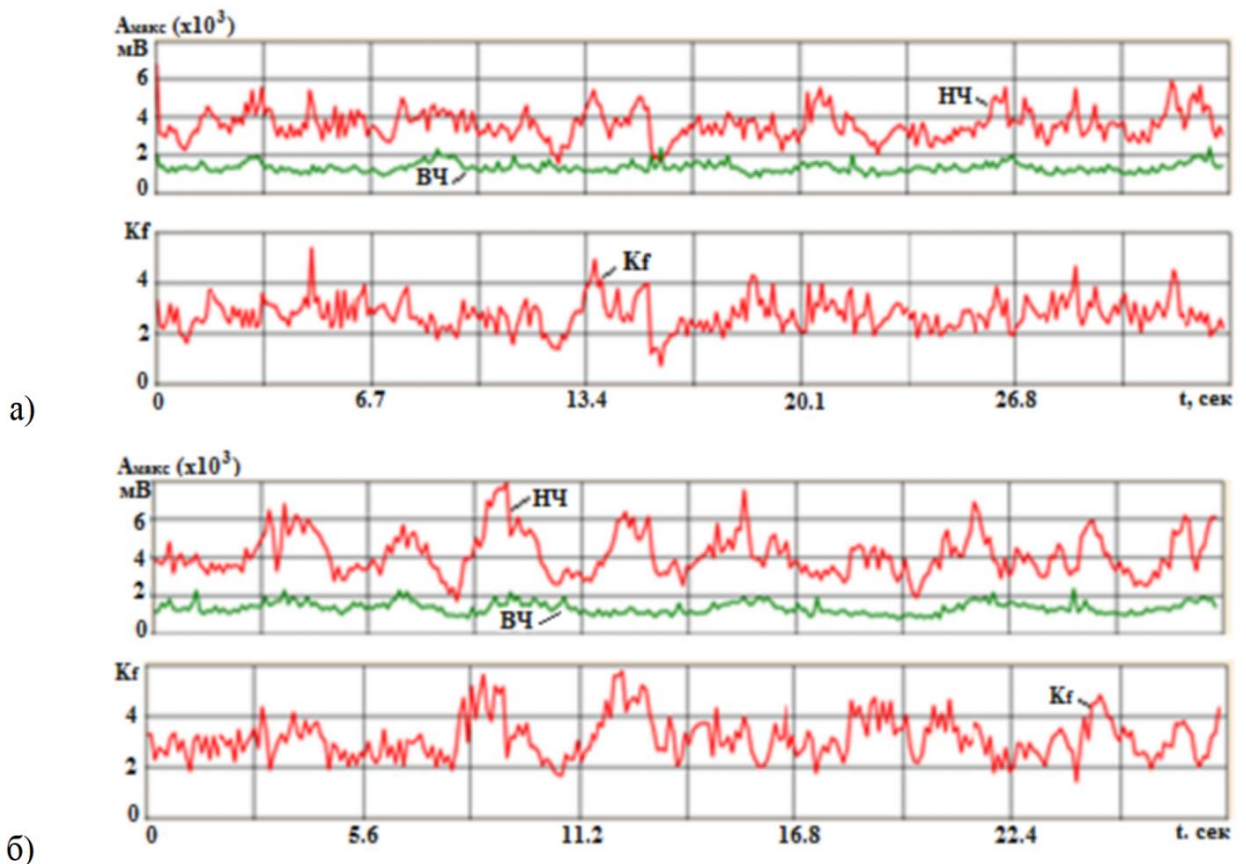


Рисунок 5.15 – Изменения параметров АЭ в конце первого (а) и четвертого (б) переходов:

НЧ и ВЧ – изменение значений максимальных амплитуд в областях низких и высоких частот; K_{F2} – отношение амплитуд на НЧ и ВЧ

Если проследить изменение параметра K_{F2} на рисунке 5.15, то в конце перехода 1 его значения превышают уровень 4 только в несколько раз на короткие периоды (рисунок 5.15(a)). В конце перехода 4 параметр K_{F2} более длительные периоды времени превышает значение 4, достигая значения 6. Это связано с увеличением площади пятна контакта и момента силы трения. Для преодоления возникающих торможений в контакте системе необходимо увеличивать крутящий момент, что уже требует некоторого времени на деформацию упругой системы. Это ведет к росту потенциальной энергии деформаций, которая постепенно расходуется на преодоление препятствий, проявляясь в виде энергетических импульсов.

По полученным экспериментальным данным была определена зависимость и построен график функции (рисунок 5.16). Экстремум полученной функции находится в пределах 10% от максимально возможного пятна контакта, а погрешность расчета составляет менее 8%.

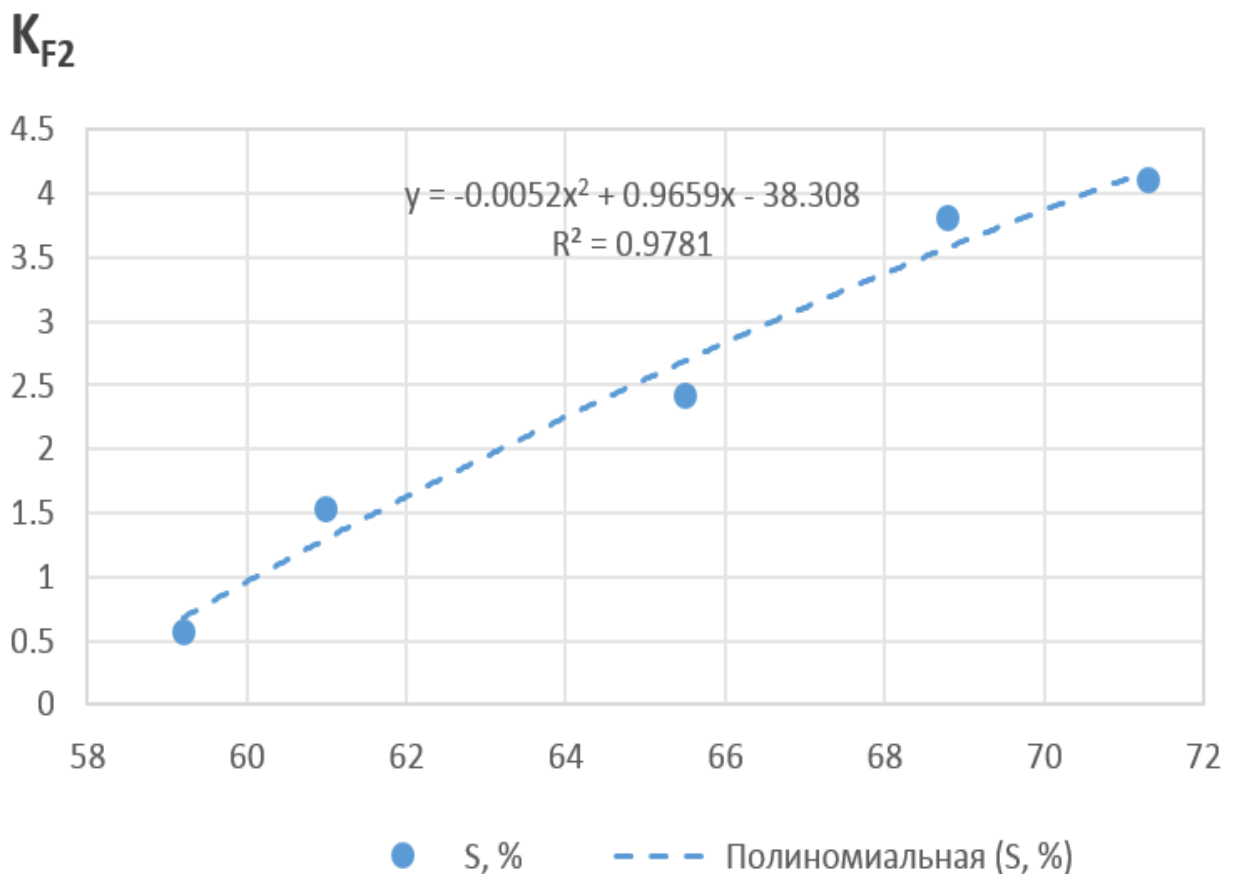


Рисунок 5.16 – График зависимости параметра K_{F2} от площади пятна контакта в сферическом соединении

5.4 Формирование практических рекомендаций по мониторингу виброакустического сигнала в процессе взаимной сферической притирки и подбору диагностических параметров

Проведенные предварительные опыты по исследованию параметров ВА сигнала при различных условиях трения в сферическом соединении демонстрируют наличие устойчивых связей параметров ВА сигналов с условиями трения на различных стадиях притертости шаровых шарниров [112].

Для исследования были определены два диапазона частот от 5 до 6 кГц и от 10 до 12 кГц, в которых наиболее ярко отражались изменения условий трения. Полученные отношения уровней СКЗ в виде коэффициента $K_{F1}=A_{5-6}/A_{10-12}$ демонстрируют рост отношения частот при добавлении смазки в зону контакта сферического соединения.

Проведенные далее исследования связей параметров сигналов АЭ с этапами процесса обработки сферических шарниров с помощью ВСП показали, что параметры АЭ могут быть использованы при создании системы акустического мониторинга для последующей автоматизации процесса обработки.

Для исследований были выделены два частотных диапазона, в которых изменения состояния фрикционного контакта отображались наиболее динамично. Это были диапазоны НЧ и ВЧ. Форма спектра сигналов АЭ во многом определялась собственными частотами упругой системы станка, на котором проводились эксперименты. При создании специализированного станка для операции ВСП состав собственных частот может измениться и другие частотные диапазоны могут оказаться более рациональными для использования в системе акустического мониторинга [110, 111]. Однако ориентация на диапазоны в области ВЧ и НЧ сохранится. Спектр собственных частот зависит от размеров обрабатываемых деталей и самого станка, от конструкции упругой системы и используемых материалов. Это потребует проведения предварительных экспериментов.

Исследования на созданном станке показали, что акустический мониторинг внутри каждого перехода опирается больше на амплитуды сигнала АЭ в области ВЧ. Истирание алмазных зерен в пасте и перераспределение жидкой фракции меняет характер взаимодействия поверхностей во фрикционном контакте, вызывая в первой части перехода резкий рост амплитуды АЭ, который потом переходит в состояние насыщения и даже снижения, что и является признаком окончания перехода и необходимости замены израсходованной пасты.

Другой момент процесса обработки, требующий мониторинга, – это определение момента окончания притирки, когда площадь пятна контакта сферических поверхностей

заметно увеличивается. Рост площади пятна контакта при перераспределении у пасты жидкой фракции вызывает рост момента силы трения (эксперименты подтверждают этот факт). В этой ситуации, в качестве диагностического признака, на первое место выходит амплитуда НЧ составляющей АЭ, у которой увеличивается разброс и растут максимальные значения. Кроме того, увеличение площади пятна контакта ведет к распределению внешней нагрузки по большей площади, что обуславливает потерю плотности передаваемой мощности, это отображается в рассмотренном параметре K_{F2} , определяемом как отношение амплитуд в области НЧ и ВЧ. Практическая апробация мониторинга значения параметра K_{F2} в производственных условиях позволила сократить уровень производственного брака при изготовлении судовых шаровых шарниров посредством ВСП на 7-9% (приложение Д).

Также было установлено влияние эффекта шаржирования абразивных зерен на характер сигнала АЭ. При возникновении шаржированных зерен происходит резкий скачок уровней огибающей СКЗ с продолжительным сохранением значений уровней. Эффект шаржирования носит негативный характер для ВСП, так как наличие абразивных зерен в готовом изделии снижает эксплуатационный ресурс сферического соединения.

Представленные исследования показали, что акустический мониторинг процесса ВСП может эффективно использоваться для контроля текущего состояния качества притираемых деталей, что повышает управляемость процесса обработки. Полученные результаты в совокупности с ранее проведенными исследованиями [100-103, 113-119] являются основой для последующего создания технологического оборудования, способного функционировать без вмешательства оператора.

5.5 Выводы по пятой главе

1. Установлено, что состояние условий трения в сферическом соединении оказывает качественное влияние на ВА сигнал. Так наличие смазки приводит к увеличению радиального зазора в соединении контактными поверхностями, но из-за нестабильности масляной пленки возникают микроудары и повышение амплитуд в области до 8,0 кГц. При этом возникающие удары не столь короткие, как без смазки, что исключает короткие по времени взаимодействия в паре трения, в отличие от сухого трения. Также полученные отношения уровней СКЗ виде коэффициента $K_{F1}=A_{5-6}/A_{10-12}$ демонстрируют рост отношения частот при добавлении смазки в зону контакта сферического соединения.

2. В результате анализа были выявлены устойчивые связи между параметром качества сферического соединения и ВА сигналом при различных условиях трения. При увеличении пятна контакта между сферическими поверхностями деталей шарового шарнира наблюдается рост общего уровня энергии ВА сигнала.

3. В качестве диагностического показателя отношения амплитуд сигналов АЭ в диапазонах НЧ и ВЧ 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} . Предложенный параметр позволяет повысить управляемость процессом ВСП за счет своевременного сигнализирования о состоянии качества обрабатываемого изделия и получаемом пятне контакта в соединении. Апробация мониторинга параметра в производственных условиях продемонстрировала сокращение брака при реализации процесса ВСП на 7-9%.

4. Установлено, 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. При этом зерно фиксируется в теле детали и вместо перекатывания по притираемой поверхности начинает вести себя подобно резцу. Возникающие риски на обрабатываемых поверхностях деталей подтверждают явление шаржирования абразивных зерен при обработке.

5. Сформированы практические рекомендации по использованию результатов исследования параметров ВА сигнала в сферическом соединении в процессе ВСП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе анализа технической литературы, экспериментальных и теоретических исследований 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.

В процессе исследования цель была декомпозирована на совокупность взаимосвязанных задач, итогом решения которых являются защищаемые положения, которые соответствуют научным и прикладным результатам, обладающим научной новизной, теоретической и практической значимостью.

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 (приложение Е).

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.

5. 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.

6. 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.

7. 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 (приложение Д).

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 СОКРАЩЕНИЙ

- ВСП – взаимная сферическая притирка
ХМП – химико-механическое полирование
ВА – виброакустический
АЭ – акустическая эмиссия
НЧ – низкая частота
ВЧ – высокая частота
СКЗ – среднеквадратическое значение
МКЭ – метод конечных элементов
СММ – скорость съема материала
СК – система координат
ПК – персональный компьютер
ПО – программное обеспечение
АПК – аппаратно-программный комплекс
ЧПУ – числовое и программное управление
КИМ – координатно-измерительная машина

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 **Аверчинков, В.И.** Технология машиностроения : учеб. пособ. [Текст] / В.И. Аверчинков, О.А. Горленко. – М. : ИНФРА–М, 2006 – 288 с.
- 2 **Орлов, П.Н.** Алмазно-абразивная доводка деталей : учеб. пособ. [Текст] / П.Н. Орлов ; Науч.-исслед. инст. инф. по маш-стр. – М. НИИМАШ, 1972 – 201 с.
- 3 **Орлов, П.Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки : учеб. пособ. [Текст] / П.Н. Орлов : М., «Машиностроение», 1988 – 384 с.
- 4 **Волков, Ю.С.** Электрофизические и электрохимические процессы обработки материалов : учеб. пособ. [Текст] / Ю.С. Волков : СПб., «Лань», 2016. – 396 с.
- 5 **Зубарев, Ю.М.** Специальные методы обработки заготовок в машиностроении : учеб. пособ. [Текст] / Ю.М. Зубарев : СПб., «Лань», 2015. – 400 с.
- 6 **Должиков, В.П.** Разработка технологических процессов механообработки в мелкосерийном производстве : учеб. пособ. [Текст] / В.П. Должиков : СПб., «Лань», 2019. – 328 с.
- 7 **Безъязычный, В.Ф.** Технологические процессы механической и физико-химической обработки в машиностроении : учеб. пособ. [Текст] / В.Ф. Безъязычный : СПб., «Лань», 2017. – 432 с.
- 8 **Звонцов, И.Ф.** Разработка технологических процессов изготовления деталей общего и специального машиностроения : учеб. пособ. [Текст] / И.Ф. Звонцов : СПб., «Лань», 2019. – 696 с.
- 9 **Бабаев, С.Г.** Притирка и доводка поверхностей деталей машин [Текст] / С.Г. Бабаев : М., «Машиностроение», 1976 – 128 с.
- 10 **Бабук, В.В.** Проектирование технологических процессов механической обработки в машиностроении : учеб. пособ. [Текст] / В.В. Бабук ; Выш. шк. – Мн. : Выш. шк., 1987. – 255 с.
- 11 **Гафаров, А.М.** Исследование шероховатости поверхностей деталей, обработанных асимметрично-безотрывочной притиркой [Текст] / А.М. Гафаров // Вестник машиностроения: науч-тех. и производ. журн. – 2018. – №2. – С. 77-82.
- 12 **Албагачиев, А.Ю.** Сопоставление трибохимической кинетики «внешнего» трения и основных положений адгезионной и молекулярно-кинетической теории трения [Текст] / А.Ю. Албагачиев // Вестник машиностроения: науч-тех. и производ. журн. – 2017. – №5. – С. 47-55.

- 13 **Мамедов, А.Т.** Изменение состава и структуры диффузионных хромовых покрытий в результате трения при взаимном контакте [Текст] / А.Т. Мамедов // Вестник машиностроения: науч.-тех. и производ. журн. – 2017. – №7. – С. 48-50.
- 14 **Соколов, С.П.** Тонкое шлифование и доводка машин [Текст] / С.П. Соколов : М., «Машиностроение», 1961.
- 15 **Масловский, В.В.** Справочным по доводочным работам [Текст] / В.В. Масловский : Х., «Прапор», 1985 – 121 с.
- 16 **Кремень, З.И.** Технология обработки абразивным и алмазным инструментом : учеб. пособ. [Текст] / З.И. Кремень: Л., «Машиностроение», 1989 – 207 с.
- 17 **Cho, В.Ј.** On the mechanism of material removal by fixedabrasive lapping of various glass substrates [Текст] / В.Ј. Cho, Н.М. Kim, R. Manivannan, D.Ј. Moon, Ј.Г. Park // Wear. — 2013. — Vol. 302, No. 1–2. — P. 1334–1339. — DOI 10.1016/j.wear.2012.11.024.
- 18 **Buijs, М., Korpel-van Houten K.** Three-body abrasion of brittle materials as studied by lapping [Текст] / М. Buijs, К. Korpel-van Houten // Wear. — 1993. — Vol. 166, No. 2. — P. 237–245.
- 19 **Malacara, D.** Handbook of optical engineering [Текст] / D. Malacara, В. Ј. Thompson. — 1st ed. — Boca Raton : CRC Press, 2001. — 550 p. — ISBN 0-8247-0576-8.
- 20 **Preston, F.W.** The structure of abraded glass surfaces [Текст] / F.W. Preston // Trans. Opt. Soc. — 1922. — Vol. 23, No. 3. — P. 141–164. — DOI: 10.1088/1475- 4878/23/3/301.
- 21 **Aspden, R.** Computer assisted optical surfacing [Текст] / R. Aspden, F.R. Nitchie // Applied Optics. — 1972. — Vol. 11, No. 12.
- 22 **Hed, P.P.** Calculations of material removal, removal rate, and Preston coefficient in continuouslapping/polishing machines [Текст] / P.P. Hed. — No. UCRL- ID- 115321. — Lawrence Livermore National Lab., CA (United States), 1993.
- 23 **Lambropoulos, Ј.С.** Loose abrasive lapping hardness of optical glasses and its interpretation [Текст] / Ј.С. Lambropoulos, S. Xu, T. Fang // Applied Optics. — 1997. — Vol. 36, No. 7. — P. 1501.
- 24 **Evans, C.J.** Material Removal Mechanisms in Lapping and Polishing [Текст] / C.J. Evans, E. Paul, D. Dornfeld [et al.] // CIRP Annals. — 2003. — Vol. 52, No. 2. — P. 611–633.
- 25 **Zhang, F.** Particle adhesion and removal in chemical mechanical polishing andpost-CMP cleaning [Текст] / F. Zhang, А.А. Busnaina, G. Ahmadi // Journal of the Electrochemical Society. — 1999. — Vol. 146, No. 7. — P. 2665–2669.

- 26 **Shi, F.G.** Modeling of chemical-mechanical polishing with soft pads [Текст] / F.G. Shi, B. Zhao // *Applied Physics A: Materials Science & Processing*. — 1998. — Vol. 67, No. 2. — P. 249–252.
- 27 **Tseng, W.T.** Re-examination of pressure and speed dependences of removal rate during chemical-mechanical polishing processes [Текст] / W.T. Tseng, Y.L. Wang // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1997. — Vol. 144, No. 2. — P. L15–L17.
- 28 **Tseng, W.T.** A comparative study on the roles of velocity in the material removal rate during chemical mechanical polishing [Текст] / W.T. Tseng, J.H. Chin, L.C. Kang // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1999. — Vol. 146, No. 5. — P. 1952–1959.
- 29 **Jin, M.** A novel functionally graded lapping and polishing method for the improvement of material removal uniformity [Текст] / M. Jin, L. Wang, S. Ye [et al.] // *Journal of Manufacturing Processes*. — 2020. — Vol. 50. — P. 102–110.
- 30 **Li, W.** A Global Correction Process for Flat Optics With Patterned Polishing Pad [Текст] / W. Li, P. Zhou, Z. Geng [et al.] // *Journal of Manufacturing Science & Engineering*. — 2019. — Vol. 141, No. 9. — P. 1.
- 31 **Liu, C.W.** Modeling of the wear mechanism during chemical-mechanical polishing [Текст] / C.W. Liu, B.T. Dai, W.T. Tseng, C.F. Yeh // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1996. — Vol. 143, No. 2. — P. 716–721.
- 32 **Chen, K.S.** Finite-element analysis on wafer-level CMP contact stress: reinvestigated issues and the effects of selected process parameters [Текст] / K.S. Chen, H.M. Yeh, J.L. Yan, Y.T. Chen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2009. — Vol. 42, No. 11–12. — P. 1118–1130.
- 33 **Tichy, J.** Contact mechanics and lubrication hydrodynamics of chemical mechanical polishing [Текст] / J. Tichy, J.A. Levert, L. Shan, S. Danyluk // *Journal of the Electrochemical Society*. — 1999. — Vol. 146, No. 4. — P. 1523–1528.
- 34 **Hu, I.** Synergetic effects of wafer rigidity and retaining-ring parameters on contact stress uniformity in chemical mechanical planarization [Текст] / I. Hu, T. Yang, K. Chen // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. — 2011. — Vol. 56, No. 5–8. — P. 523–538.
- 35 **Kim, A.T.** Soft Elastohydrodynamic Lubrication With Roughness [Текст] / A.T. Kim, J. Seok, J.A. Tichy, T.S. Cale // *Journal of Tribology*. — 2003. — Vol. 125, No. 2. — P. 448.
- 36 **Jin, X.** 3D EHL Simulation of CMP [Текст] / X. Jin, L.M. Keer, Q.A. Wang // *Journal of the Electrochemical Society*. — 2005. — Vol. 152, No. 1. — P. G7.

- 37 **Wagner, R.E.** Fabrication of aspherics using a mathematical model for material removal [Текст] / R.E. Wagner, R.R. Shannon // *Applied Optics*. — 1974. — Vol. 13, No. 7. — P. 1683–1689.
- 38 **Suratwala, T.I.** Convergent Pad Polishing of Amorphous Silica [Текст] / T. Suratwala, R. Steele, M. Feit [et al.] // *International Journal of Applied Glass Science*. — 2012. — Vol. 3, No. 1. — P. 14–28.
- 39 **Suratwala, T.I.** Toward Deterministic Material Removal and Surface Figure During Fused Silica Pad Polishing [Текст] / T.I. Suratwala, R. Steele, M. Feit // *Journal of the American Ceramic Society*. — 2010.
- 40 **Walker, D.D.** The 'Precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces [Текст] / D.D. Walker, D. Brooks, A. King [et al.] // *Optics Express*. — 2003. — Vol. 11, No. 8. — P. 958–964.
- 41 **Kim, D.W.** Static tool influence function for fabrication simulation of hexagonal mirror segments for extremely large telescopes [Текст] / D.W. Kim, S.W. Kim // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13, No. 3. — P. 910–917.
- 42 **Cheung, C.F.** Modelling and simulation of structure surface generation using computer controlled ultra-precision polishing [Текст] / C.F. Cheung, L.B. Kong, L.T. Ho, S. To // *Precision Engineering*. — 2011. — Vol. 35, No. 4. — P. 574–590.
- 43 **Ong, N.S.** Semi-ductile grinding and polishing of Pyrex glass [Текст] / N.S. Ong, V.C. Venkatesh // *Journal of Materials Processing Technology*. — 1998. — Vol. 83, No. 1. — P. 261–266.
- 44 **Pan, R.** Modification of tool influence function of bonnet polishing based on interfacial friction coefficient [Текст] / R. Pan, B. Zhong, D. Chen [et al.] // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. — 2018. — Vol. 124. — P. 43–52.
- 45 **Téllez-Arriaga, L.** Correction of the Preston equation for low speeds [Текст] / L. Téllez-Arriaga, A. Cordero-Dávila, C.I. Robledo-Sánchez // *Applied Optics*. — 2007. — Vol. 46, No. 9. — P. 1408–1410.
- 46 **Yang, M.Y.** Local material removal mechanism considering curvature effect in the polishing process of the small aspherical lens die [Текст] / M.Y. Yang, H.C. Lee // *Journal of Materials Processing Technology*. — 2001. — Vol. 116, No. 2. — P. 298–304.
- 47 **Fu, G.** The relationship between wafer surface pressure and wafer backside loading in Chemical Mechanical Polishing [Текст] / G. Fu, A. Chandra // *Thin Solid Films*. — 2005. — Vol. 474, No. 1–2. — P. 217–221.
- 48 **Xu, W.** Effects of the ultrasonic flexural vibration on the interaction between the abrasive particles; pad and sapphire substrate during chemical mechanical polishing (CMP)

[Текст] / W. Xu, X. Lu, G. Pan [et al.] // Applied Surface Science. — 2011. — Vol. 257, No. 7. — P. 2905–2911.

49 **Shi, Y.** The constant force control based on an optimized environmental model for the robotic lapping of curved surface [Текст] / Y. Shi, J. Wang, X. He, Y. Peng // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2023. — Vol. 127. — P. 5051–5062.

50 **Yang, L.** Effect of workpiece rotational speed on surface quality in YAG double-sided planetary lapping with the trajectory method [Текст] / L. Yang, X. Guo, R. Kang [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2022. — Vol. 127. — P. 5051–5062. — DOI: 10.21203/rs.3.rs-1260696/v1.

51 **Zhou, P.** A mixed elastohydrodynamic lubrication model with layered elastic theory for simulation of chemical mechanical polishing [Текст] / P. Zhou, D. Guo, R. Kang, Z. Jin // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2013. — Vol. 69. — P. 1009–1016. — DOI: 10.1007/s00170-013-5108-5.

52 **Zhou, P.** A mixed elastohydrodynamic lubrication model for simulation of chemical mechanical polishing with double-layer structure of polishing pad [Текст] / P. Zhou, Z. Dong, R. Kang [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2015. — Vol. 77. — P. 107–116. — DOI: 10.1007/s00170-014-6438-7.

53 **Geng, Z.** Prediction of Surface Profile Evolution of Workpiece and Lapping Plate in Lapping Process [Текст] / Z. Geng, P. Zhou, L. Meng, Y. Yan, D. Guo // Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2021. — Vol. 144, No. 8. — P. 1–40. — DOI 10.1115/1.4053279.

54 **Deaconescu, T.** Developing an analytical model and computing tool for optimizing lapping operations of flat objects made of alloyed steels [Текст] / T. Deaconescu, A. Deaconescu // Materials. — 2020. — Vol. 13, No. 6. — P. 1–15. — DOI: 10.3390/ma13061343.

55 **Zhao, L.** A real-time dressing method for metal lapping pads based on the thermal-deformation effect [Текст] / L. Zhao, H. Zhao, H. Wang [et al.] // Research Square. — 2022. — Vol. 120, No. 2. — P. 1–14. — DOI: 10.1007/s00170-022-08869-y.

56 **Коропец, П.А.** Особенности развития фрикционных автоколебаний в многомассовых динамических системах [Текст] / П.А. Коропец // Исследовано в России, — 2011 — С. 658–671.

57 **Деев, А.А.** Акустические колебания в фрикционном контакте как способ контроля поверхностей трения на этапе приработки двигателей внутреннего сгорания

[Текст] / А.А. Деев // Вестник Рязанского государственного университета имени С.А. Есенина. – 2010. – № 4(29). – С. 132-148.

58 **Баранов, А.В.** Комплексное исследование характеристик фрикционного контакта стальных поверхностей [Текст] / А.В. Баранов, А.Н. Пономарева, С.В. Тарасевич // Ползуновский альманах. – 2008. – № 3. – С. 97-98.

59 **Рубцов, В.Е.** Использование акустической эмиссии для анализа процессов изнашивания при трении скольжения [Текст] / В.Е. Рубцов, Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, В.Л. Попов // Письма в Журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, № 4. – С. 79-86.

60 **Колубаев, Е.А.** Анализ акустической эмиссии при трении скольжения высокомарганцовистой стали [Текст] / Е.А. Колубаев, А.В. Колубаев, О.В. Сизова // Письма в Журнал технической физики. – 2010. – Т. 36, № 16. – С. 55-61.

61 **Смолин, А.Ю.** Частотно-временной анализ акустических колебаний, генерируемых при трении: моделирование и эксперимент [Текст] / А.Ю. Смолин, А.И. Дмитриев, Е.А. Колубаев, С.Г. Псахье // Письма в Журнал технической физики. — 2010. — Т. 36, вып. 13. — С. 47–53.

62 **Kozochkin, M.P.** Acoustic Properties of Contact in Dry Friction [Текст] / M.P. Kozochkin // Russian Engineering Research. — 2015. — Vol. 35, No. 6. — P. 452–457.

63 **Козочкин, М.П.** Виброакустический мониторинг фрикционного контакта при шлифовании [Текст] / М.П. Козочкин // Трение и износ. — 2017. — Т. 38, №4. — С. 386–391.

64 **Кузин, В.В.** Взаимосвязь виброакустического сигнала с износом керамической детали при фрикционном взаимодействии со стальным диском [Текст] / В.В. Кузин, С.Н. Григорьев, М.П. Козочкин и др. // Новые огнеупоры. — 2021. — №9. — С. 62–67.

65 **Митрофанов, А.П.** Экспериментальное исследование процесса резания единичным абразивным зерном при различных условиях смазывания [Текст] / А.П. Митрофанов, И.А. Растегаев, М.П. Козочкин, К.О. Житников // СТИН. — 2025. — №2. — С. 2–8.

66 **Osada, T.** Monitoring of Lapping Process by Audible Sound [Текст] / T. Osada, H. Ohuchi, T. Kasai // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. — 2000. — Vol. 66, No. 4. — P. 640–644.

67 ROTAGO : проспект / EFCO Düren. — URL: https://www.efco-dueren.de/upload/prospekte_ab/russisch/r_30_ROTAGO_web.pdf (дата обращения: 15.10.2023).

68 **Robotic arm** [Электронный ресурс] // Wikipedia : The Free Encyclopedia. — URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Robotic_arm (дата обращения: 15.10.2023).

69 **Патент № 2 772 527 C1 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. — Текст : непосредственный.

70 **Патент № 2 797 801 C1 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. — Текст : непосредственный.

71 **Патент № 2 797 803 C1 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. — Текст : непосредственный.

72 **Патент № 2 797 804 C1 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. — Текст : непосредственный.

73 **Патент № 2 797 805 C1 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. — Текст : непосредственный.

74 **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. — Текст : непосредственный.

75 **Клачков, В.А.** Станок для взаимной сферической притирки деталей шарового шарнира [Текст] / 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.

76 **Добронравов, В.В.** Курс теоретической механики [Текст] : учеб. пособ. / В.В. Добронравов : М., «Высш. школа», 1974 – 528 с.

77 **Аппель, П.** Трактат о теоретической механике [Текст] : учеб. пособ. В 2 т. Т.2. Статика. Динамика точки / П. Аппель. Перевод И.Г. Малкина : М., Изд. Физ-мат. Лит., 1960. – 515 с.

78 **Крылов, А.Н.** Общая теория качки корабля на волнении, Избранные труды [Текст] / А.Н. Крылов. – М. : Изд. АН СССР, 1958. – С. 7–92.

79 **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики [Текст] : учеб. пособ. В 5 т. Т.1. Механика / Д.В. Сивухин : М., Изд. «МФТИ», 2005. – 560 с. – ISBN 5-9221-0225-7; 5-89155-078-4.

80 Проекция Меркатора [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Проекция_Меркатора (дата обращения: 20.11.2023).

81 **Гордеев, В.Н.** Кватернионы и бикватернионы с приложениями в геометрии и механике [Текст] : учеб. пособ. / В. Н. Гордеев. — Киев : Сталь, 2016. — 315 с. — ISBN 978- 617- 676- 099- 3.

- 82 **Иванов, М. Г.** Аналитическая механика и электродинамика : учебное пособие : в 2 т. Т. 2: Статика. Динамика точки / М.Г. Иванов ; пер. с франц. И. Г. Малкина. — Москва : Физматлит, 1960. — 515 с.
- 83 **Попов, Г.Я.** Контактные задачи для линейно-деформируемого основания // Г.Я. Попов – Одесса: Вища шк., 1982. – 167с.
- 84 **Сернов, В.А.** Механика грунтов, основания и фундаменты [Текст] : учеб. пособ. В 2 ч. Ч.1. / В.А. Сернов и др. — Минск : БНТУ, 2020. — 218 с.
- 85 **Смирнов, Ю.П.** Об эффектах трения в сферическом шарнире [Текст] / Ю.П. Смирнов // Известия ТулГУ. Технические науки : научно-технический журнал. — 2012. — № 2. — С. 387–394.
- 86 **Биргер, И.А.** Расчет на прочность деталей машин [Текст] : справоч. / И.А. Биргер. и др.: М., Машиностроение., 1993. – 640 с. – ISBN 5-217-01304-0.
- 87 **Писаренко, Г.С.** Сопротивление материалов [Текст] : учеб. / Г.С. Писаренко. : Киев., Вища шк., 1986. – 775 с.
- 88 Метод конечных элементов [Электронный ресурс] // Википедия: свободная энциклопедия. — URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов (дата обращения: 10.12.2023).
- 89 Учебное пособие по курсу "Механика грунтов" / А.А. Петраков, В.В. Яркин, Р.А. Таран, Т.В. Казачек ; под ред. А.А. Петракова. — Макеевка : ДонНАСА, 2004. — 164 с.
- 90 **Власов, В.З.** Избранные труды. Т. 3: Тонкостенные пространственные системы [Текст] / В.З. Власов. — Москва : Академия наук СССР, 1964. — 472 с.
- 91 Упругость и неупругость : материалы Международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвящённого 100- летию со дня рождения А.А. Ильюшина (Москва, 20–21 января 2011 года) [Текст] / под ред. И.А. Кийко, Г.Л. Бровко, Р.А. Васина. — Москва : Издательство Московского университета, 2011. — 483 с. — ISBN 978- 5- 211- 05992- 4.
- 92 **Егорова, Е.С.** Модели грунтов, реализованные в программных комплексах SCAD Office и Plaxis 3D [Текст] / Е.С. Егорова, А.В. Иоскевич, В.А. Иоскевич // Строительство уникальных зданий и сооружений. — 2016. — № 3 (42). — С. 31–60.
- 93 **Лукаш, П.А.** Основы нелинейной строительной механики [Текст] / П.А. Лукаш. — Москва : Стройиздат, 1978. — 208 с.
- 94 **Варламов, А.А.** Закономерности связи напряжений и деформаций в бетоне [Текст] / А.А. Варламов, Е.А. Шишлонов, Е.Н. Ткач и др. // Academy. — 2016. — № 2 (5). — С. 7–16.

- 95 **Каменев, С.В.** Основы метода конечных элементов в инженерных приложениях: учебн. пособ. [Текст] / С. В. Каменев; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 110 с.
- 96 **Копытов, Н.П.** Равномерное распределение точек на поверхностях и его применение в исследованиях структурно-неоднородных сред: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 [Текст] / Копытов Никита Павлович; [Место защиты: Перм. нац. исслед. политехн. ун-т]. — Екатеринбург, 2015. — 121 с.
- 97 **Волынский, Б.А.** Сферическая тригонометрия : учебное пособие [Текст] / Б.А. Волынский. — Москва : НАУКА, 1977. — 136 с.
- 98 **Кремер, Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие [Текст] / Н. Ш. Кремер. — Москва : ЮНИТИ- ДАНА, 2010. — 551 с.
- 99 **Requicha, A.A.G.** Boolean operations in solid modeling: Boundary evaluation and merging algorithms [Текст] / A.A.G. Requicha, H.V. Voelcker // Proceedings of the IEEE. — 1985. — Vol. 73, No. 1. — P. 30–44. — DOI: 10.1109/proc.1985.13108.
- 100 **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.
- 101 **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.
- 102 **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.
- 103 **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.
- 104 **Григорьев, С.Н.** Диагностика автоматизированного производства [Текст] / С.Н. Григорьев, В.Д. Гурин, М.П. Козочкин // – М.: Машиностроение – 2011. С. 600.
- 105 **Григорьев, С.Н.** Методы контроля и диагностики в машиностроении [Текст] / С.Н. Григорьев, М.П. Козочкин, Ф.С. Сабиров, В.А. Синопальников // Технология машиностроения. – 2012. – № 1. – С. 45 – 50.

106 **Козочкин, М.П.** Виброакустический мониторинг фрикционного контакта при шлифовании [Текст] / М.П. Козочкин // Трение и износ. — 2017. — Т. 38, № 4. — С. 386–391.

107 **Kozochkin, M.P.** Effect of adhesion bonds in friction contact on vibroacoustic signal and autooscillations [Текст] / M.P. Kozochkin, A.N. Porvatov // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, No. 5. — P. 389–395. — DOI: 10.3103/S106836661405008X.

108 **Grigoriev, S.N.** Features of changes in the parameters of acoustic signals characteristic of various metalworking processes and prospects for their use in monitoring [Текст] / S.N. Grigoriev, M.P. Kozochkin, A.N. Porvatov [et al.] // Applied Sciences. — 2024. — Vol. 14, No. 1. — P. 367. — DOI: 10.3390/app14010367.

109 **Козочкин, М.П.** Влияние износа режущей кромки инструмента на деформацию поверхностного слоя детали и параметры виброакустических сигналов [Текст] / М.П. Козочкин, М.А. Волосова, Д.Г. Алленов // Materials Science Forum. — 2016. — Т. 876. — С. 50–58. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.876.50.

110 **Завгородний, В.И.** Влияние динамических характеристик инструмента и заготовки на результаты виброакустического мониторинга процесса резания [Текст] / В.И. Завгородний, М.П. Козочкин, А.Р. Маслов, Ф.С. Сабиров // СТИН. — Newton2010. — № 6. — С. 13–17.

111 **Козочкин, М.П.** Информационно-измерительные и управляющие системы силовых и виброакустических параметров [Текст] / М.П. Козочкин, А.Р. Маслов, А.Н. Порватов // Измерительная техника. — 2015. — № 8. — С. 5–9.

112 **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.

113 **Клачков, В.А.** Исследование математических моделей процесса притирки [Текст] / В.А. Клачков // Актуальные вопросы инновационного развития Арктического региона РФ : Сборник статей VI Всероссийской научно-практической конференции, Северодвинск, 18–30 ноября 2024 года. – Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2025. – С. 595-600.

114 **Клачков, В.А.** Подход к имитационному моделированию процесса притирки деталей шарового шарнира [Текст] / В.А. Клачков // 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.

115 **Клачков, В.А.** Алгоритм имитационного моделирования эксплуатационного износа шарового шарнира [Текст] / В.А. Клачков // 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.

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

117 **Клачков, В.А.** Исследование основных факторов производительности и качества процесса притирки [Текст] / В. А. Клачков // 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: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2023. – С. 297-302.

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

119 **Клачков, В.А.** Исследование технологического процесса изготовления изделия «Шарнир шаровой» [Текст] / 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: Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, 2020. – С. 37-40.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Структура аппаратно-программного комплекса информационного сопровождения экспериментального и программно-имитационного исследования взаимной сферической притирки

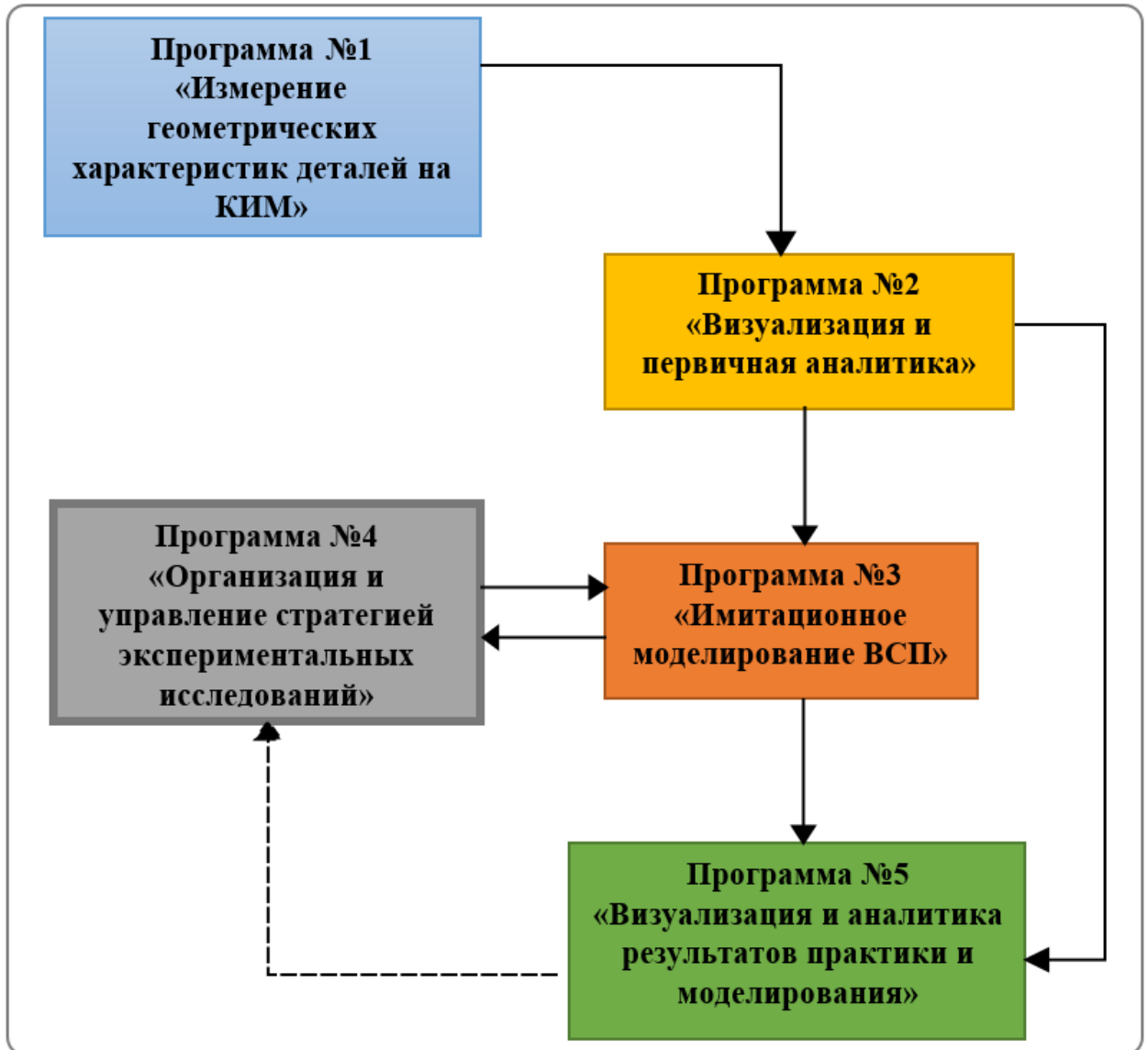


Рисунок А.1 – Блок-схема АПК

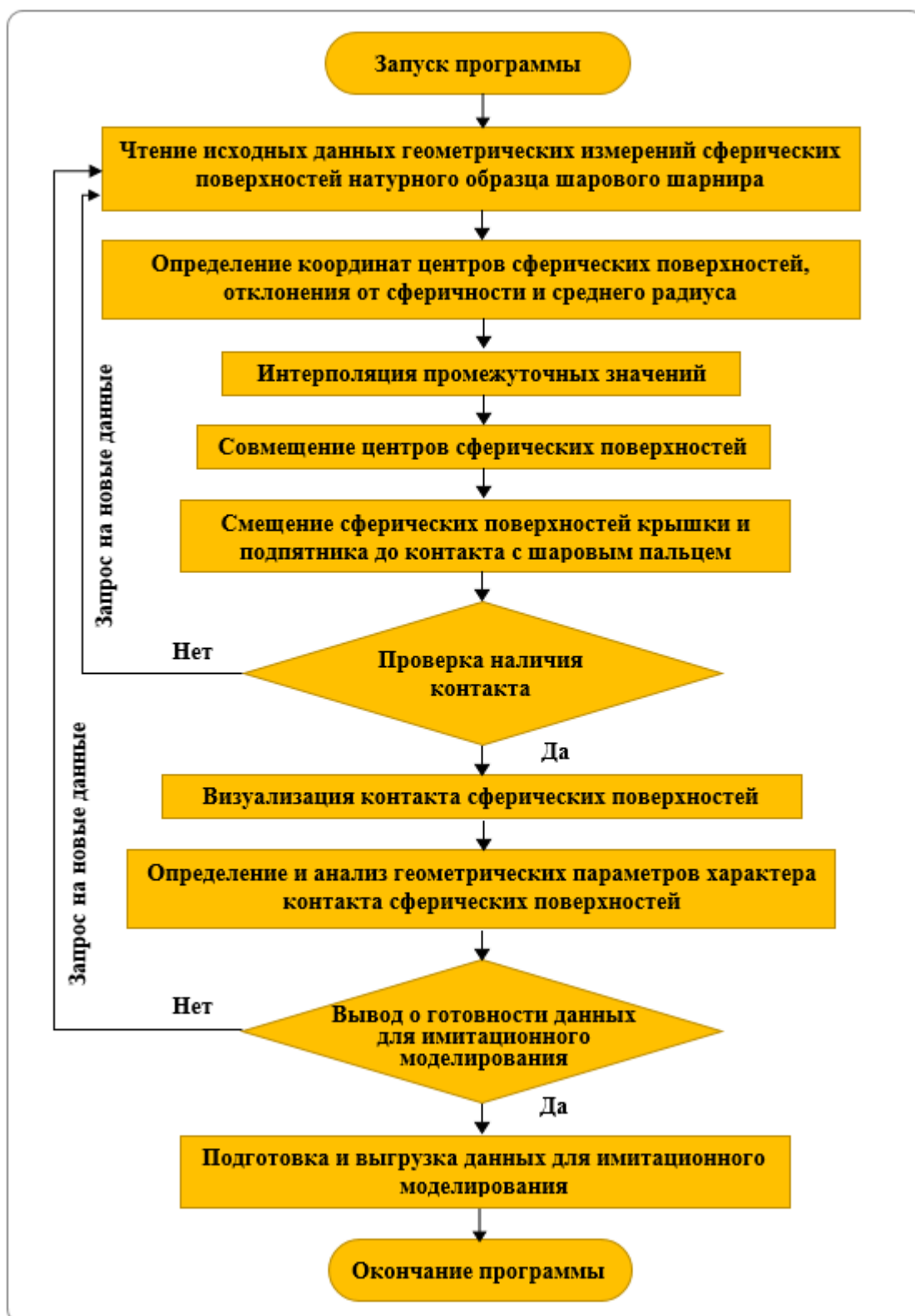


Рисунок А.2 – Блок-схема алгоритма программы «Визуализация и первичная аналитика»

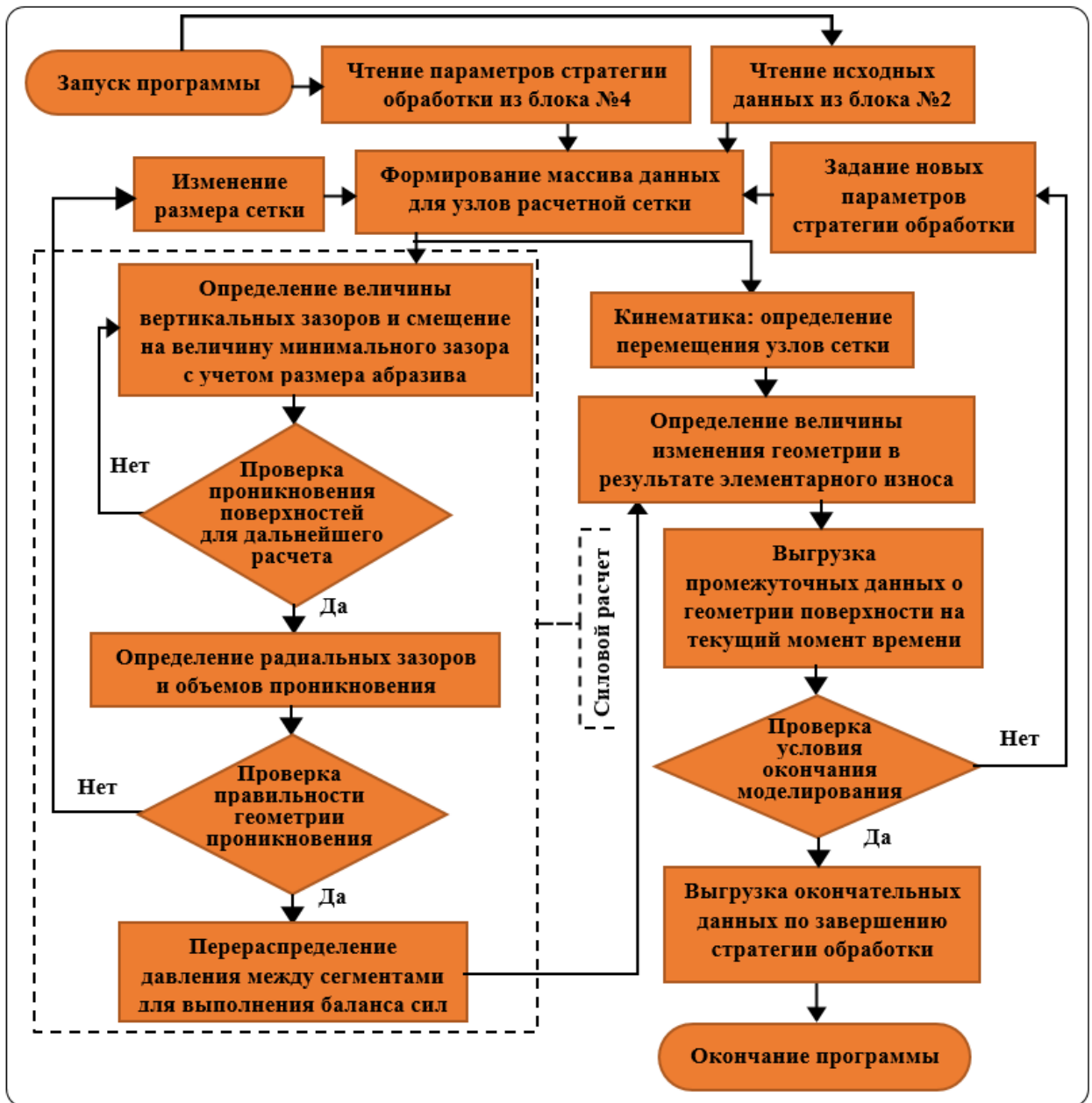


Рисунок А.3 – Блок-схема алгоритма программы «Имитационное моделирование ВСП»

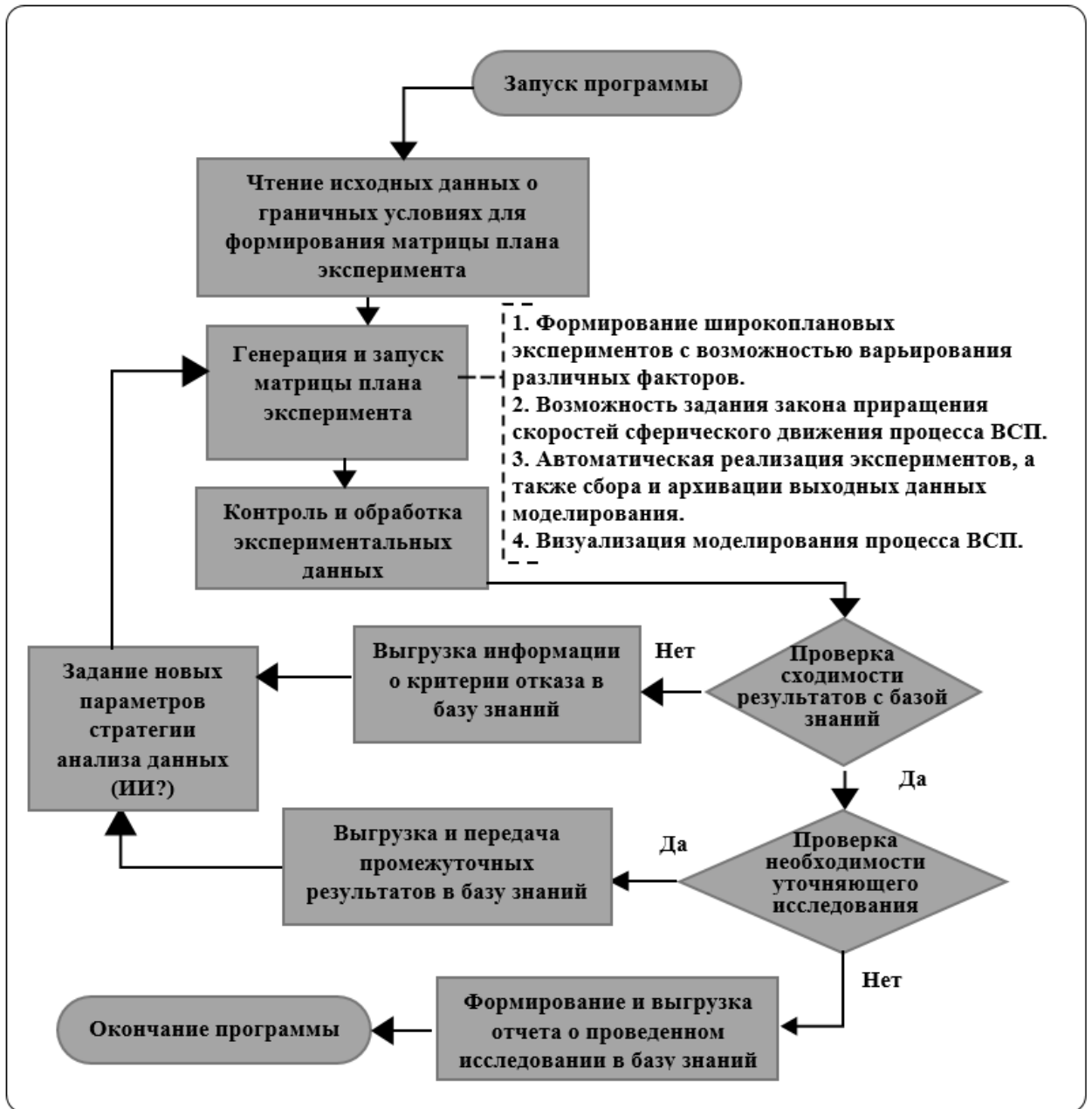


Рисунок А.4 – Блок-схема алгоритма программы «Организация и управление стратегией экспериментальных исследований»

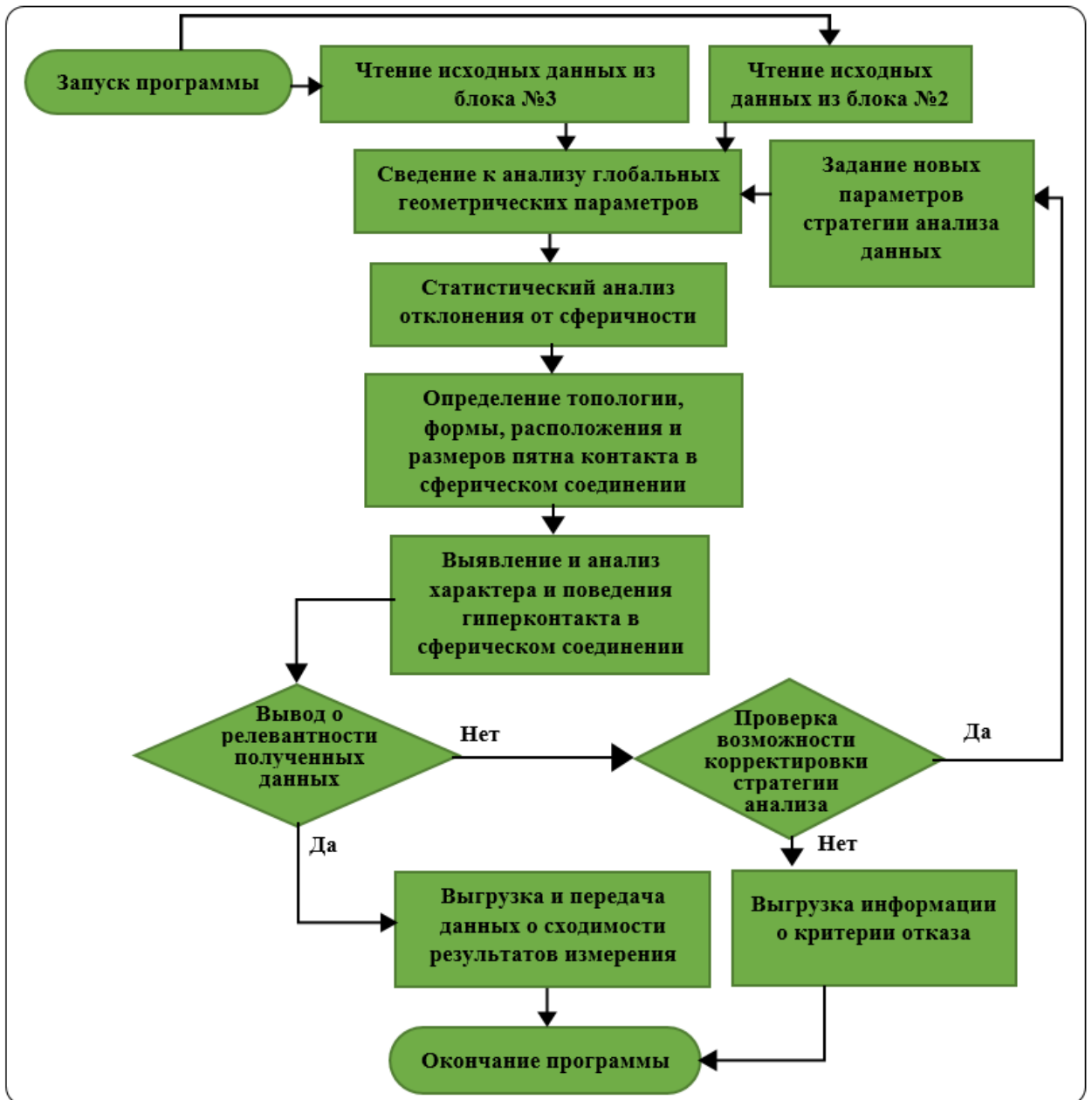


Рисунок А.5 – Блок-схема алгоритма программы «Визуализация и аналитика результатов практики и моделирования»

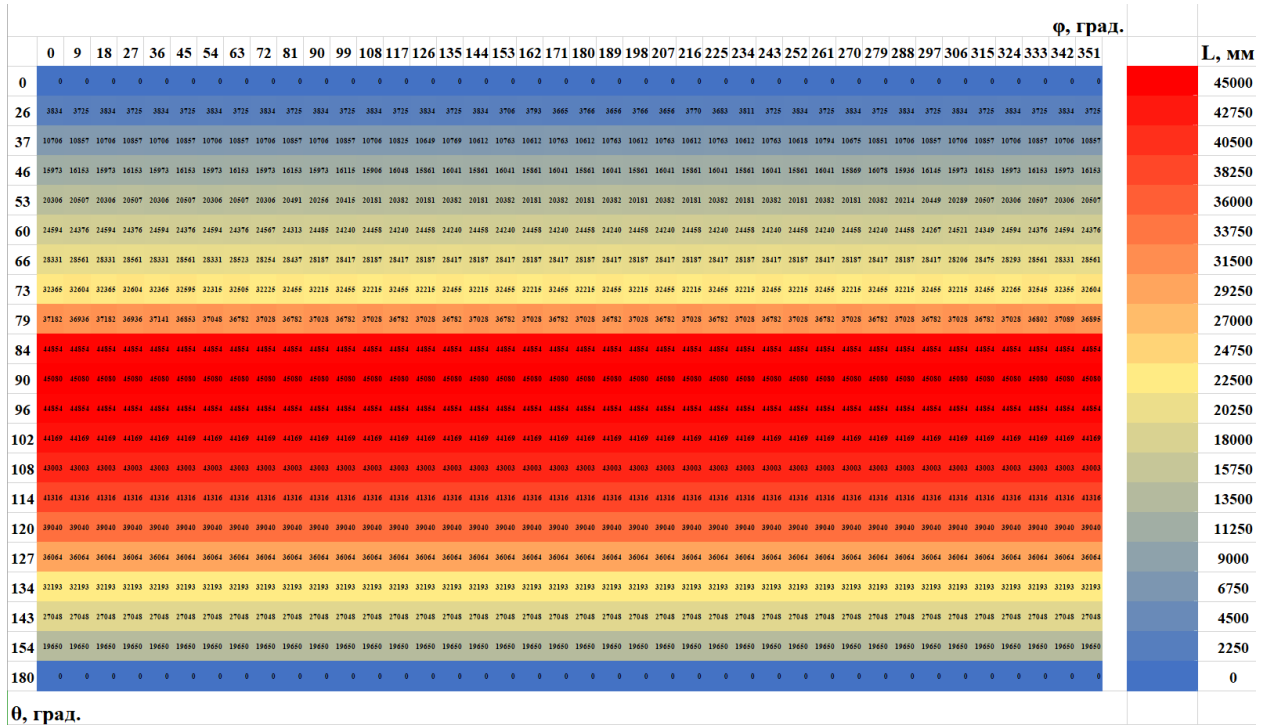


Рисунок Б.3 – Карта пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности шарового пальца для опыта №2

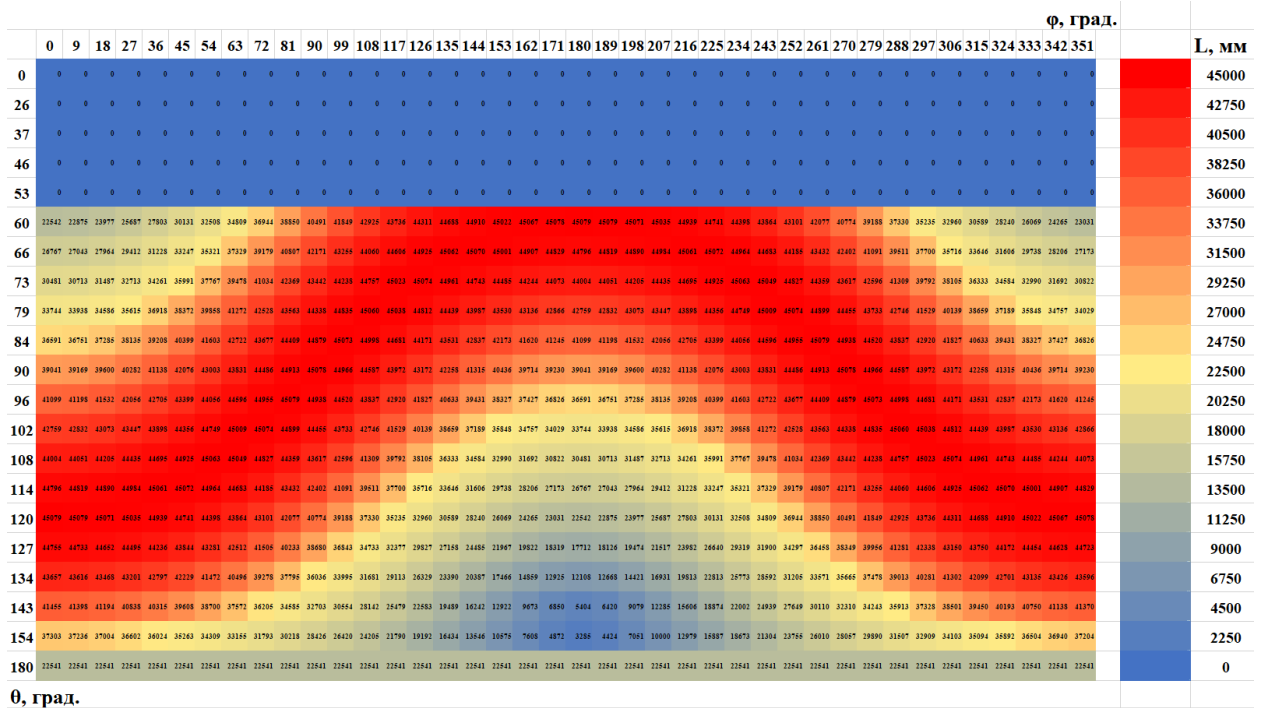


Рисунок Б.4 – Карта пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности крышки и подпятника для опыта №2

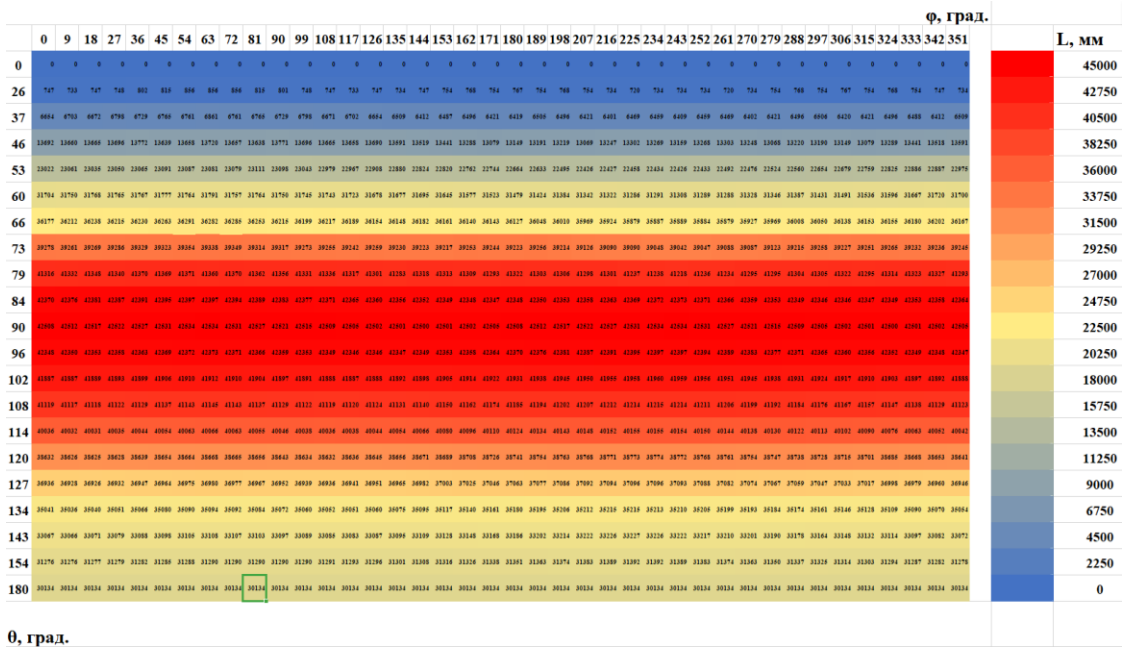


Рисунок Б.9 – Карта пройденных путей элементарными сегментами сферической поверхности шарового пальца для опыта №5

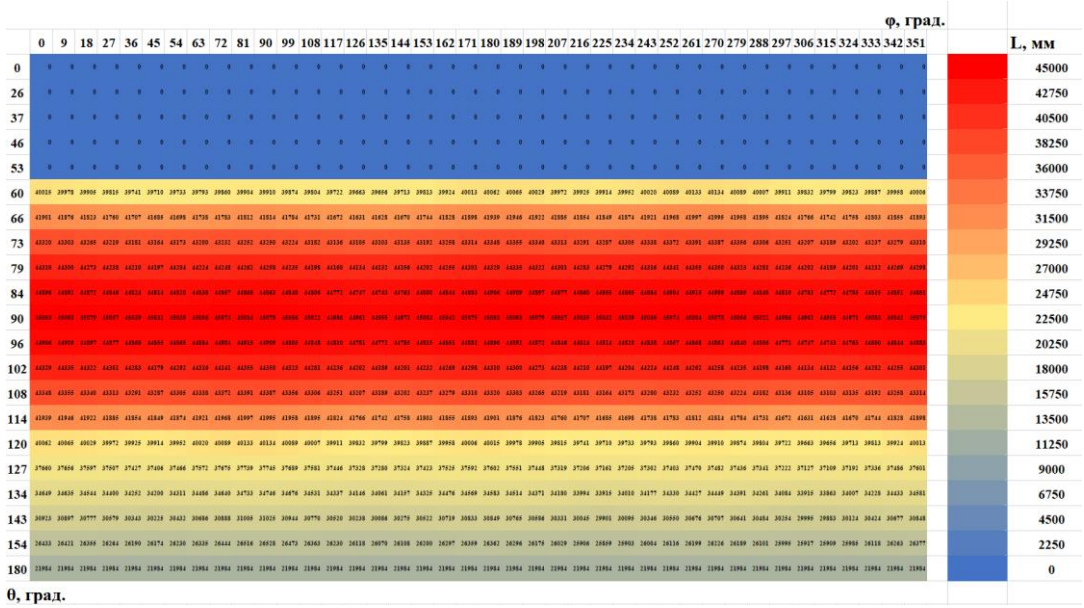


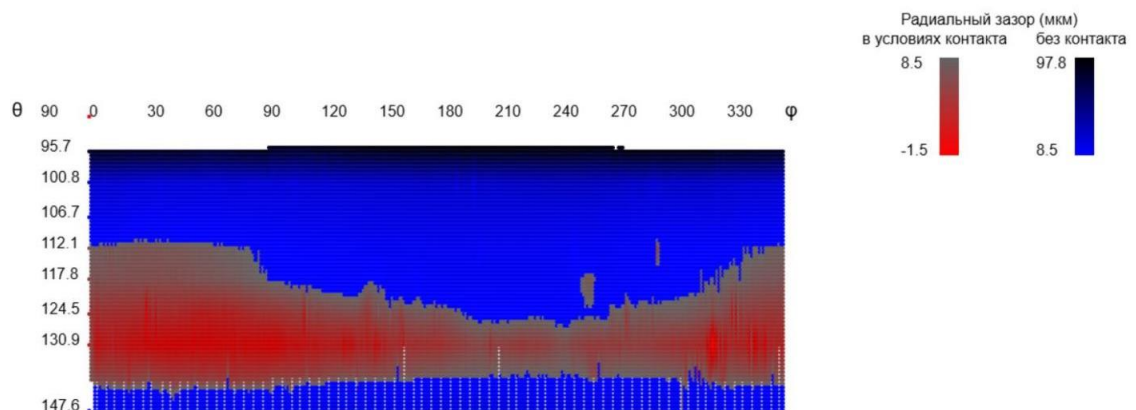
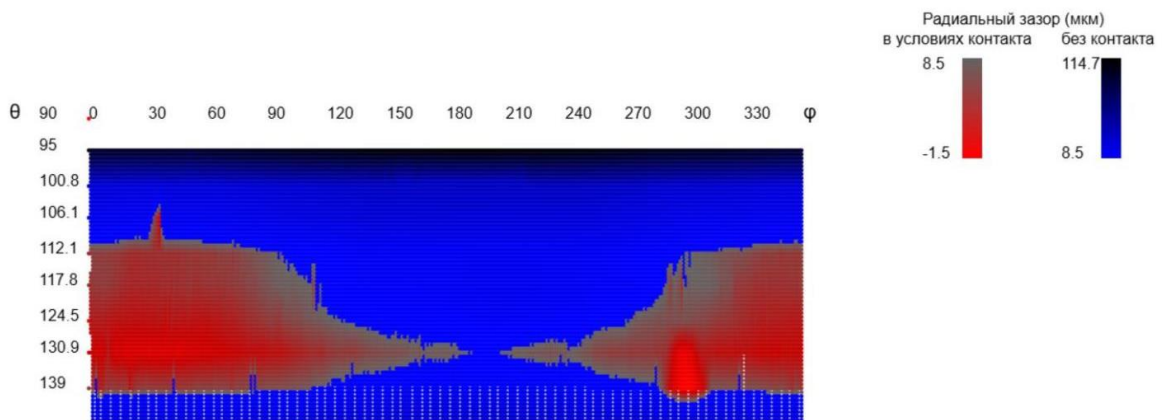
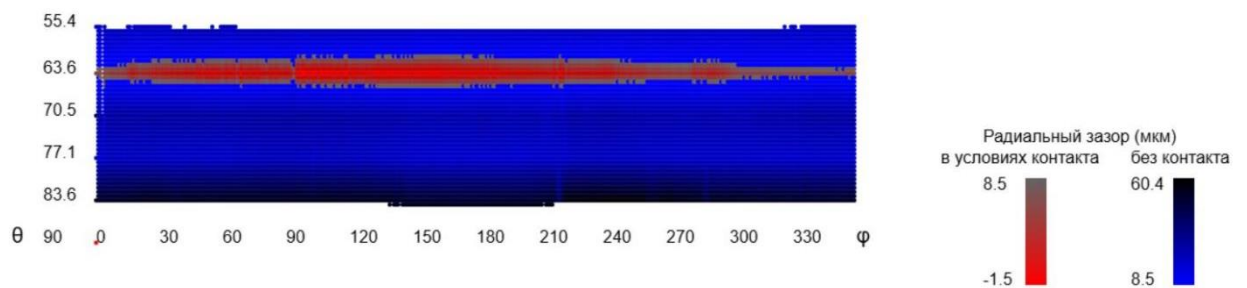
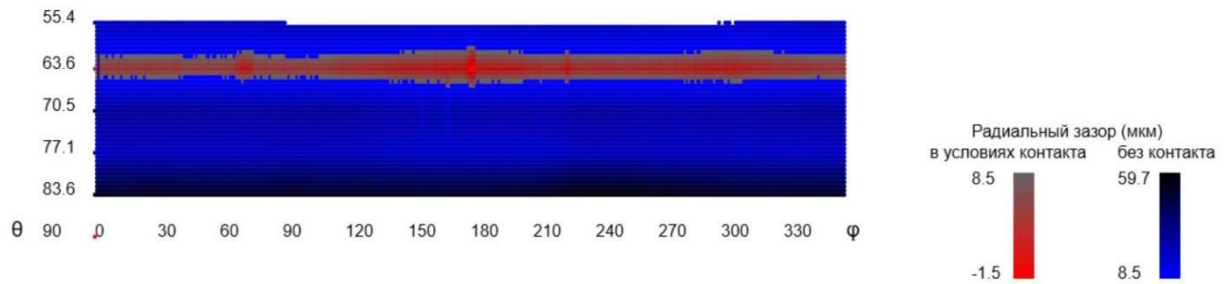
Рисунок Б.10 – Карта пройденных путей элементарными сегментами сферической крышки и подпятника для опыта №5

Таблица Б.1 – Характеристика накопленных путей для выбранных стратегий обработки

№ Опыта	ω_{ψ} град/с	ω_{ϕ} град/с	ω_{ϕ} , град/с	Стартовое значение угла нутацции θ , град.	L_{min}/L_{max} (Шаровой Палец)	L_{mean}/L_{max} (Шаровой Палец)	σ (Шаровой Палец), мм	L_{min}/L_{max} (Подпятник, Крышка)	L_{mean}/L_{max} (Подпятник, Крышка)	σ (Подпятник, Крышка), мм
1	0	0	100	0	0,283	0,773	14591	0,303	0,825	10317
2	0	0	100	30	0,462	0,651	16594	0,519	0,813	11734
3	100	0	75	30	0,16	0,656	13042	0,108	0,815	9222
4	25	100	50	0	0,214	0,696	13728	0,340	0,831	9707
5	100	25	-50	0	0,081	0,799	1195	0,938	0,972	845

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Экспериментальные данные по исследованию характера съема припуска с поверхностями при различных стратегиях обработки



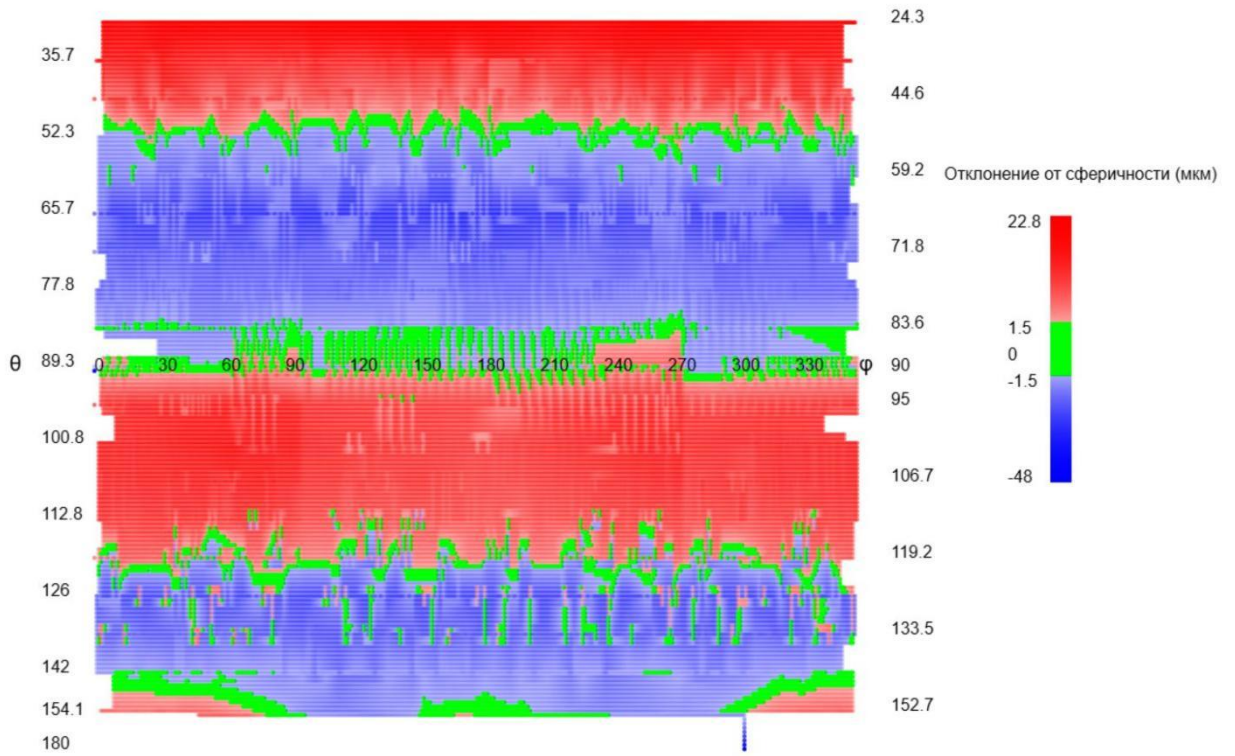


Рисунок В.5 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №1 до притирки

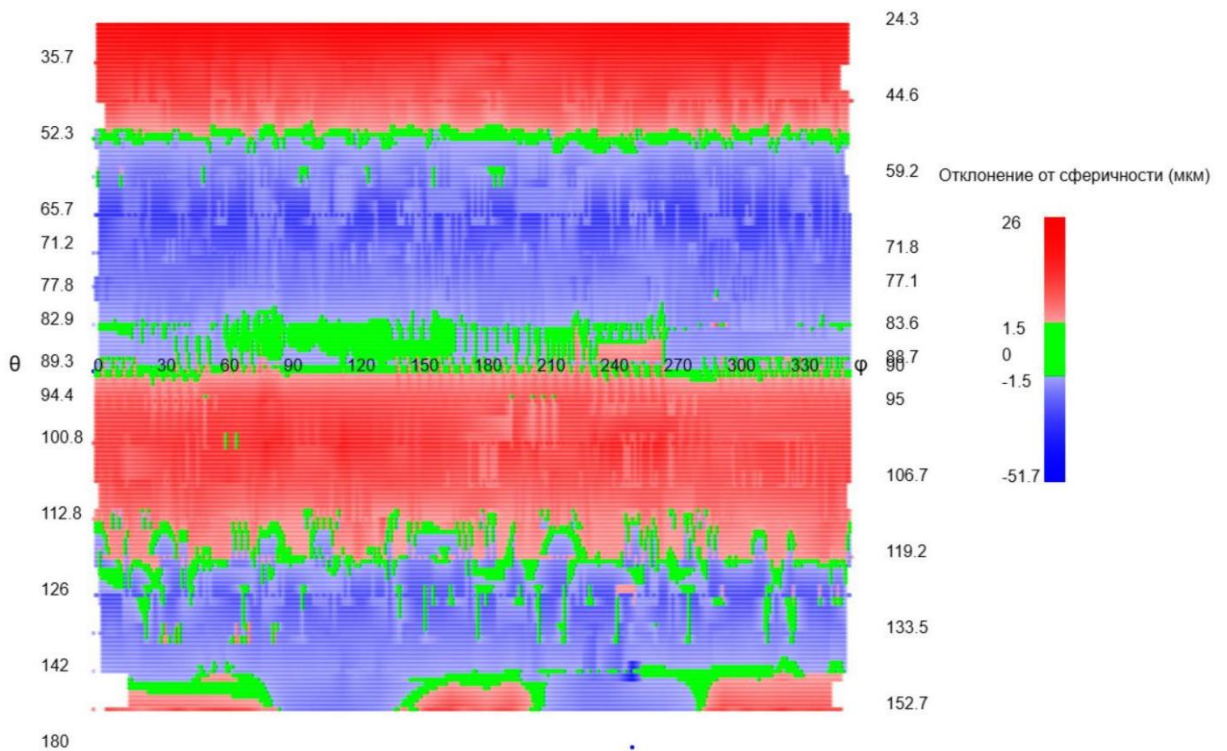


Рисунок В.6 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №1 после притирки

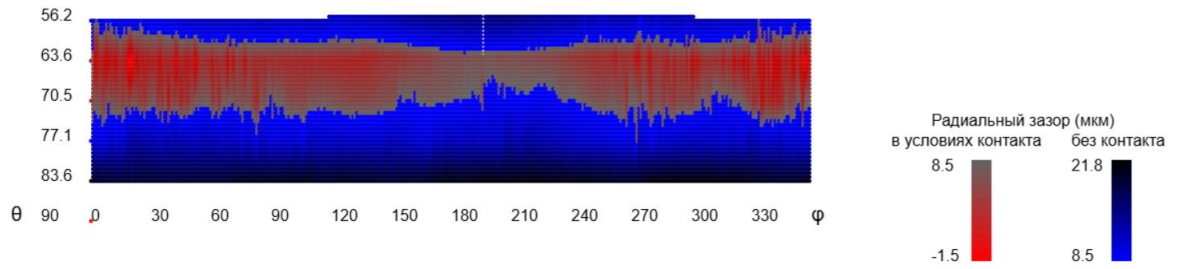


Рисунок V.7 – Развертка сферической поверхности крышки №2 до притирки

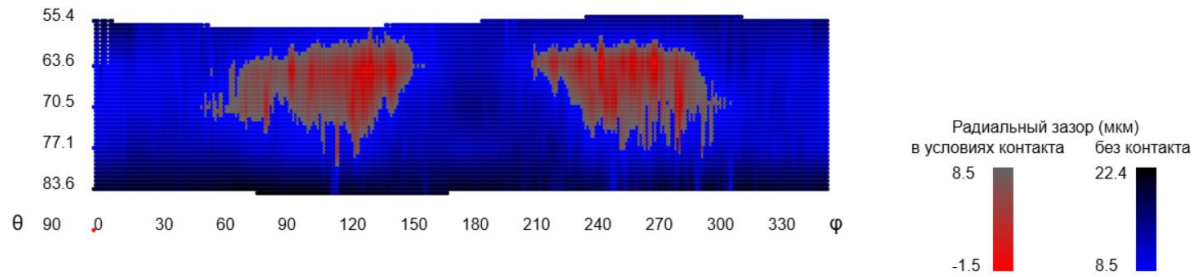


Рисунок V.8 – Развертка сферической поверхности крышки №2 после притирки

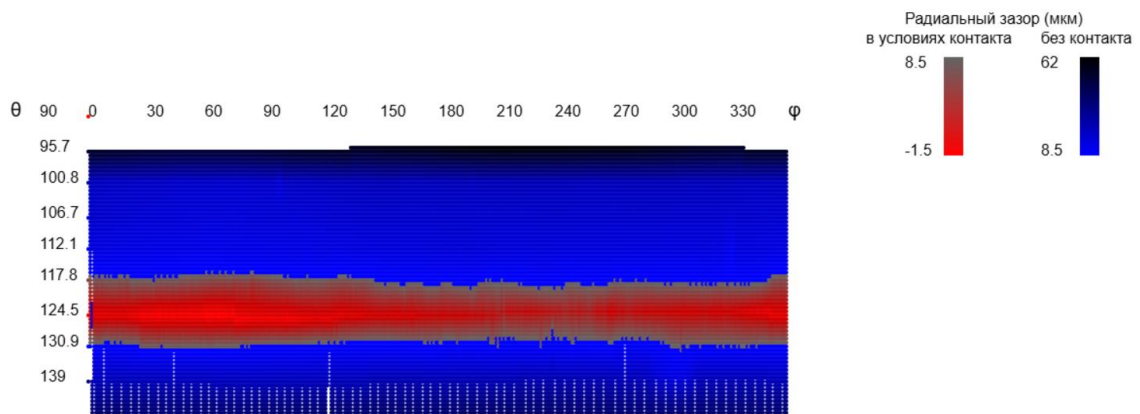


Рисунок V.9 – Развертка сферической поверхности подпятника №2 до притирки

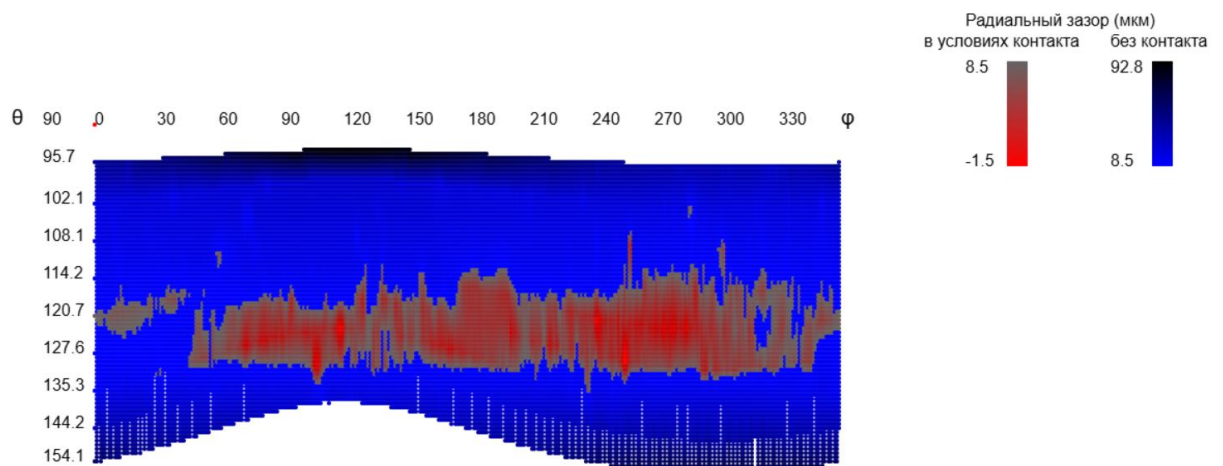


Рисунок V.10 – Развертка сферической поверхности подпятника №2 после притирки

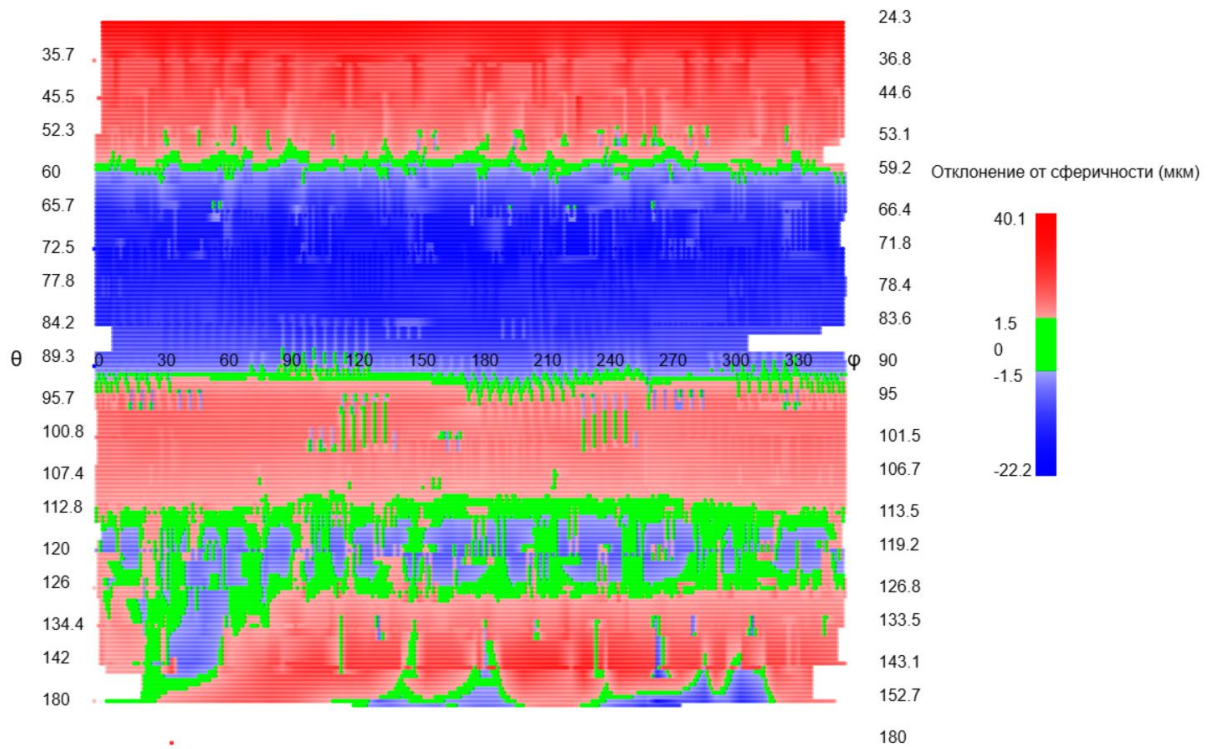


Рисунок В.11 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №2 до притирки

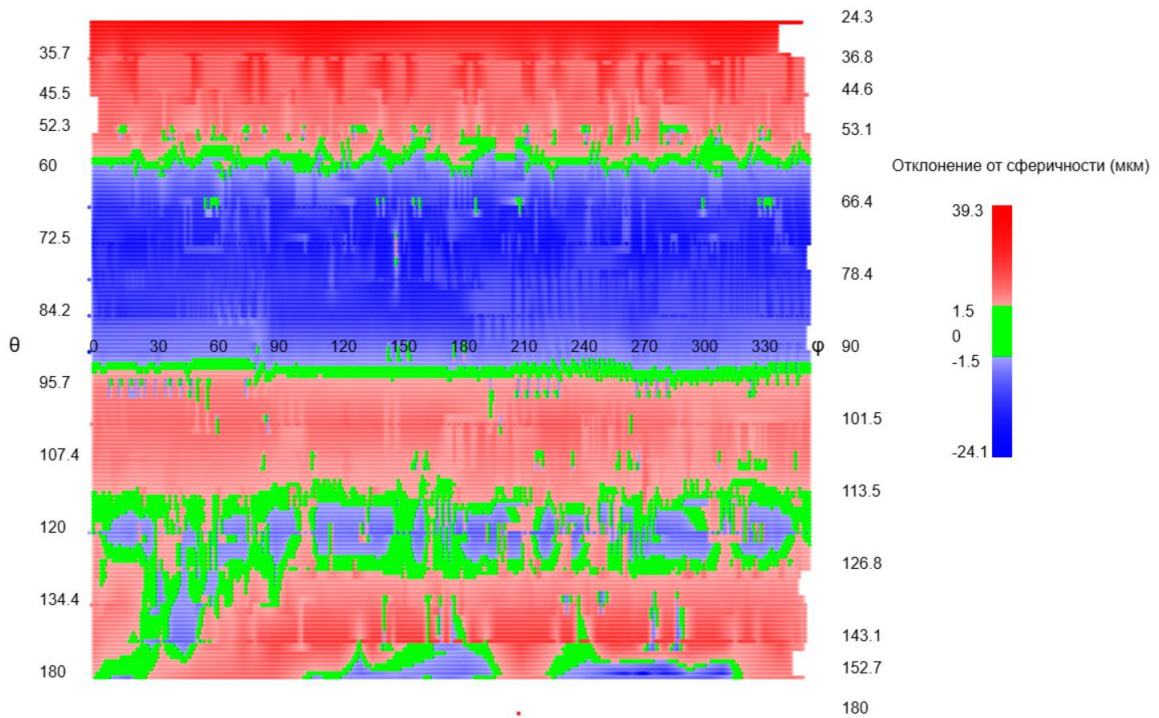


Рисунок В.12 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №2 после притирки

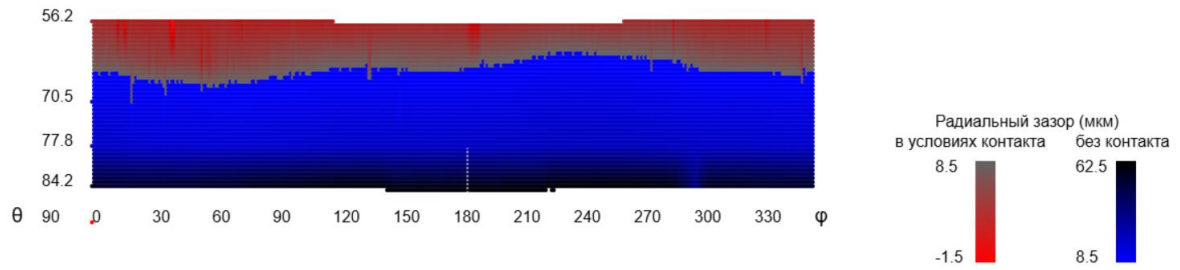


Рисунок В.13 – Развертка сферической поверхности крышки №3 до притирки

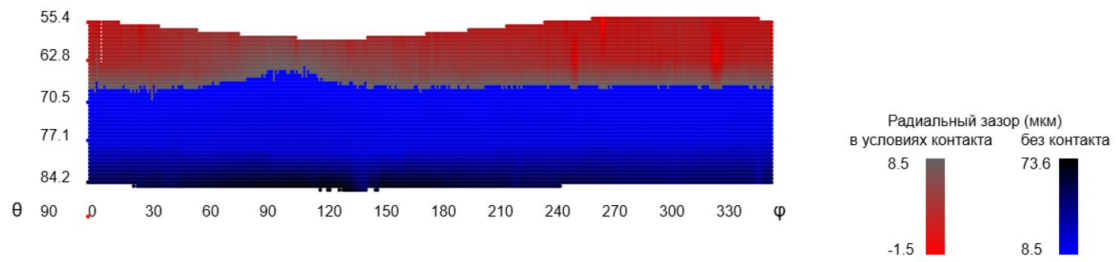


Рисунок В.14 – Развертка сферической поверхности крышки №3 после притирки

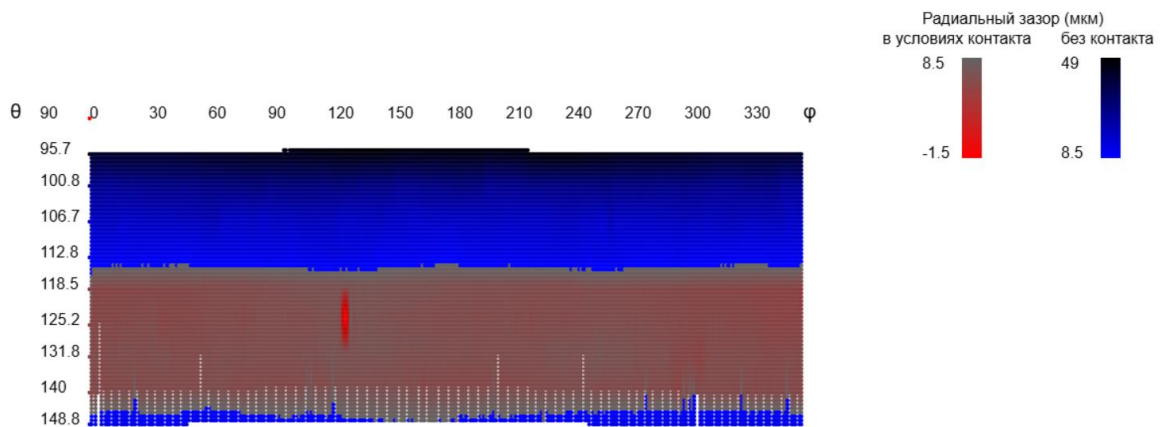


Рисунок В.15 – Развертка сферической поверхности подпятника №3 до притирки

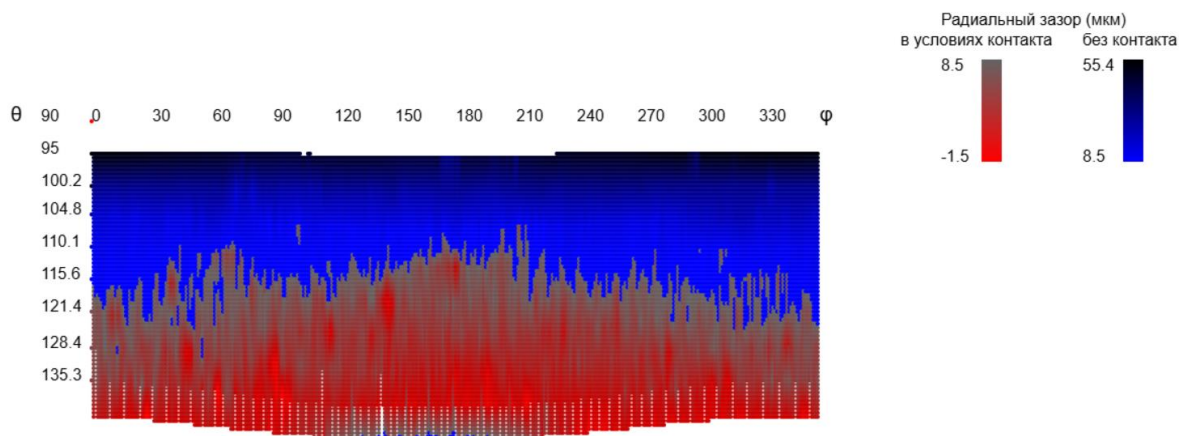


Рисунок В.16 – Развертка сферической поверхности подпятника №3 после притирки

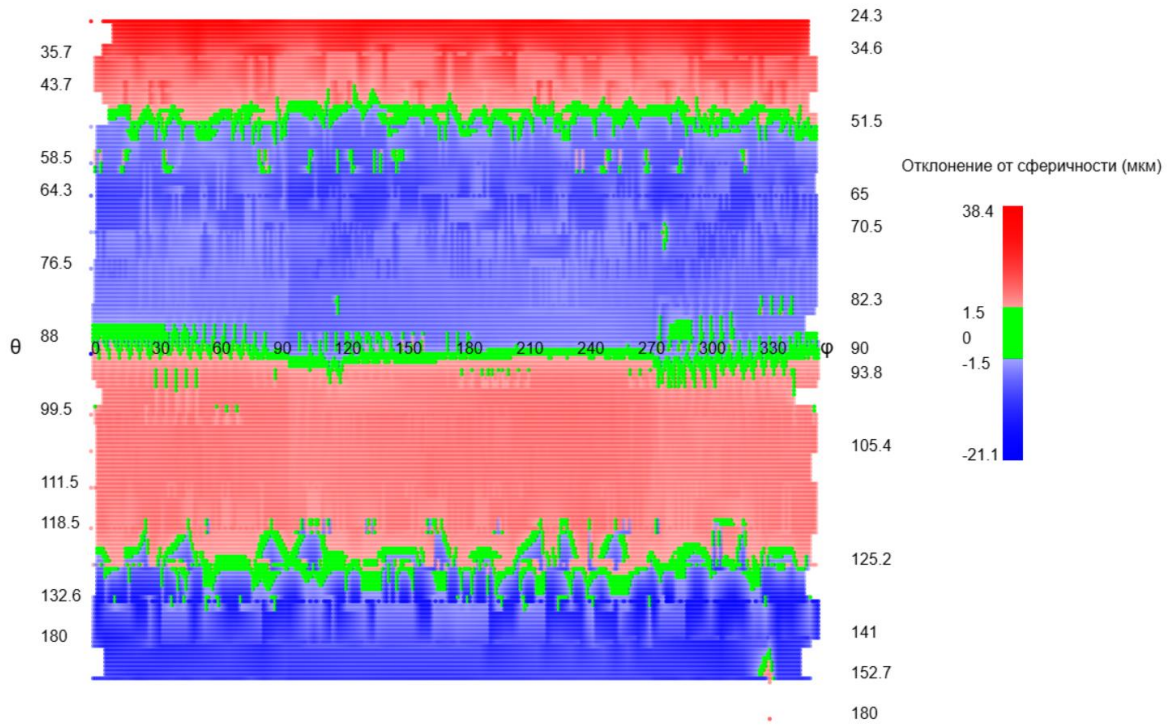


Рисунок В.17 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №3 до притирки

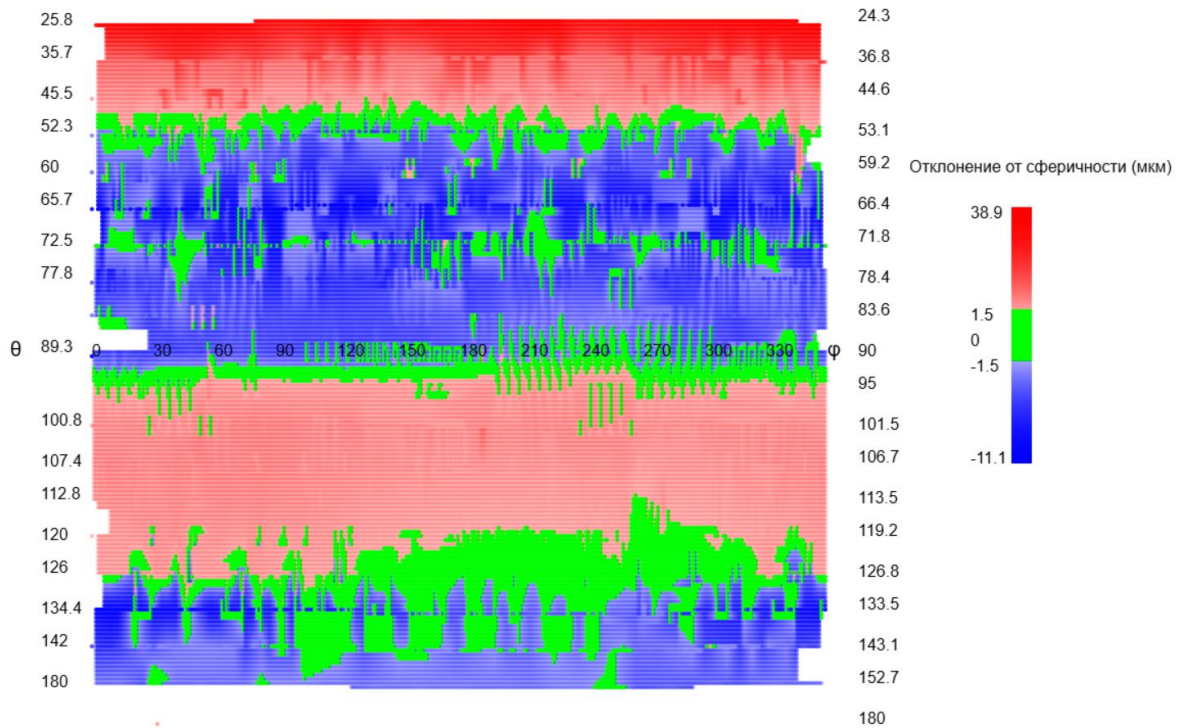
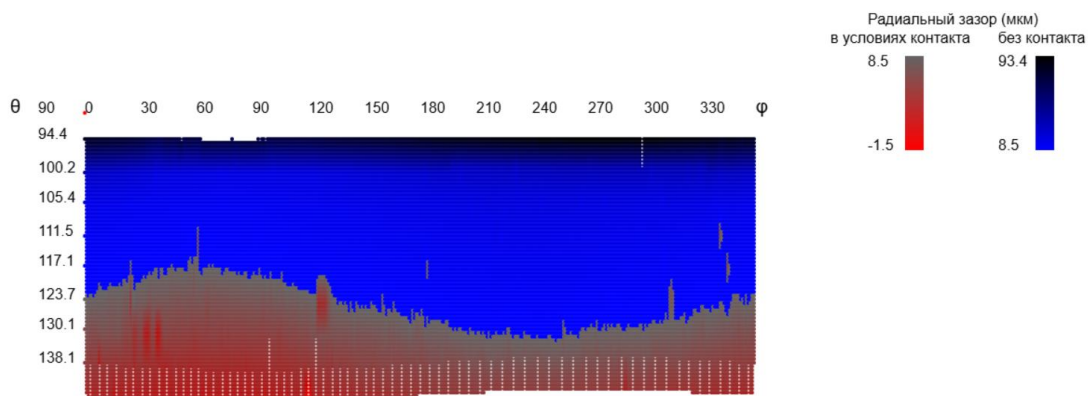
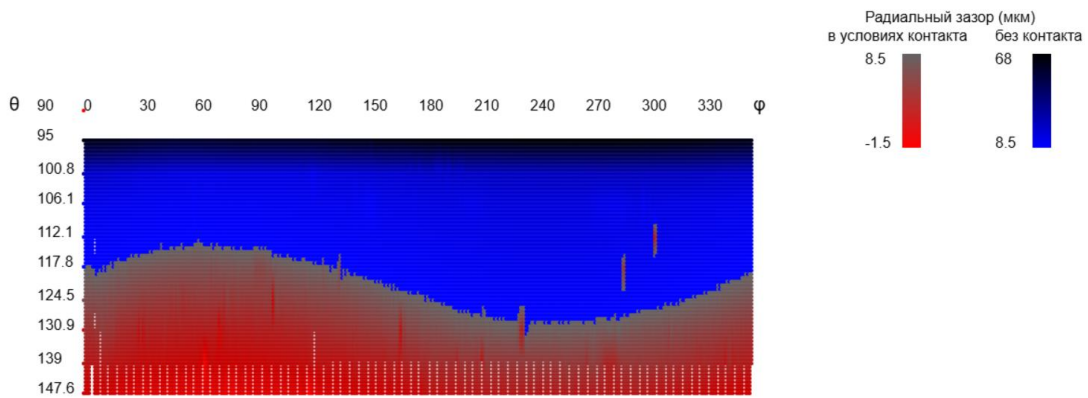
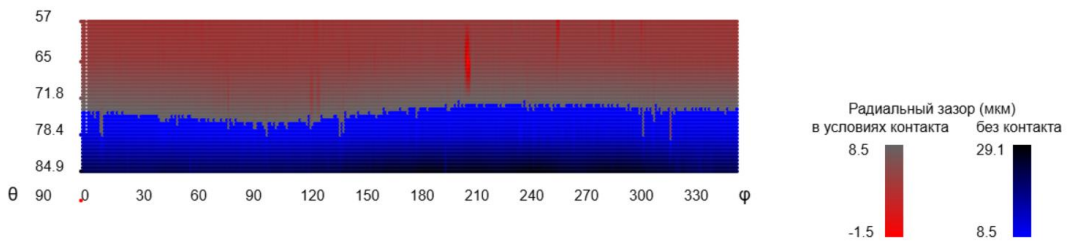
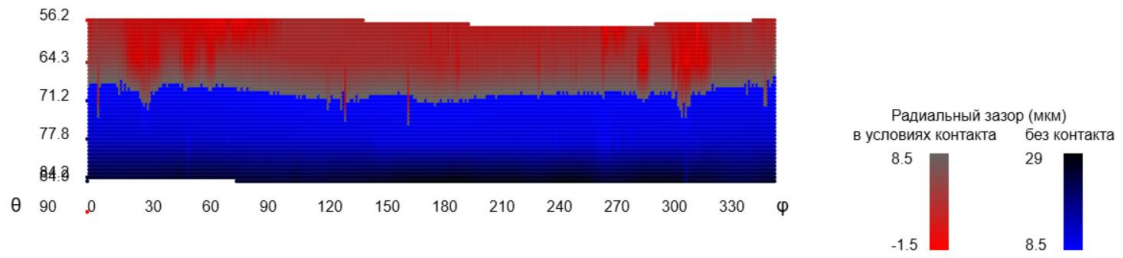


Рисунок В.18 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №3 после притирки



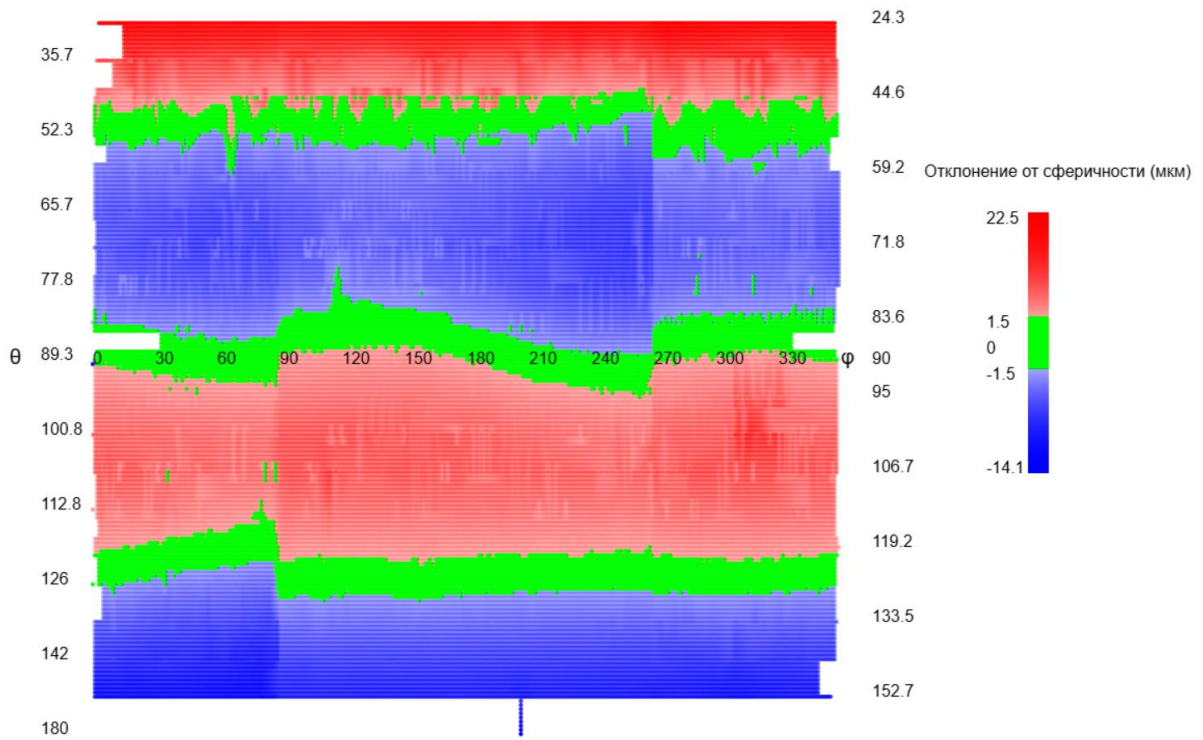


Рисунок В.23 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №4 до притирки

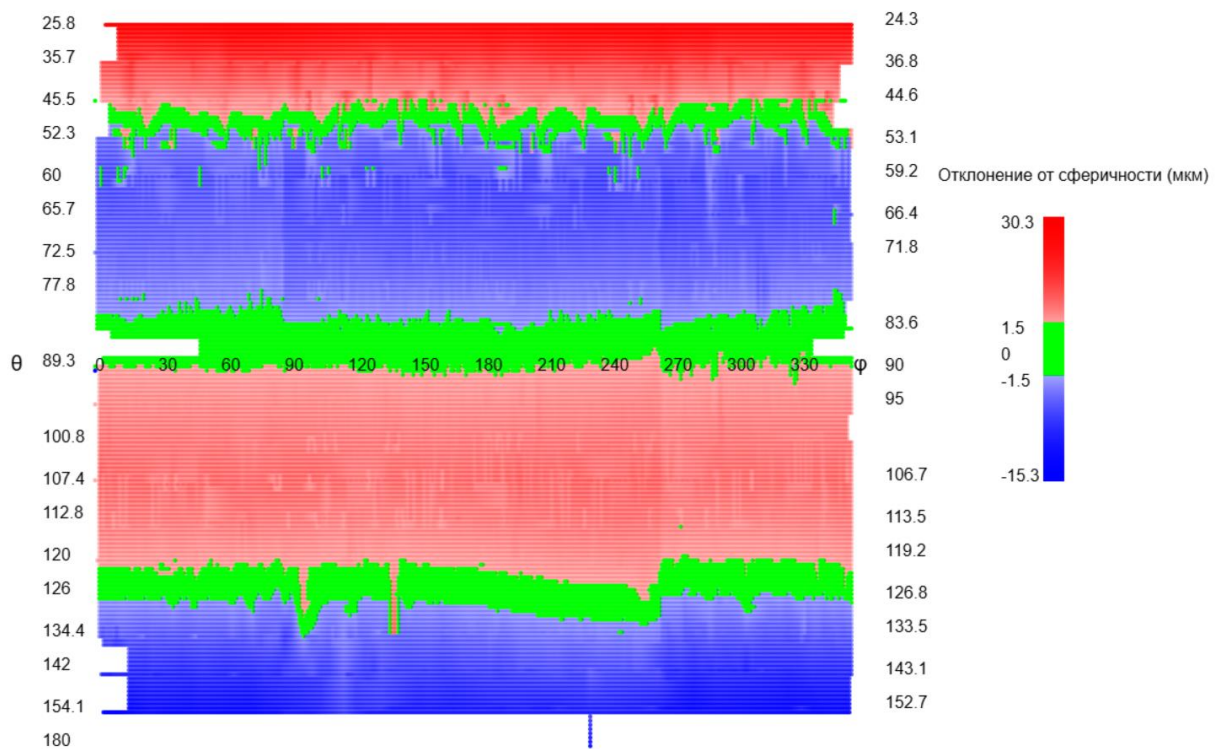


Рисунок В.24 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №4 после притирки

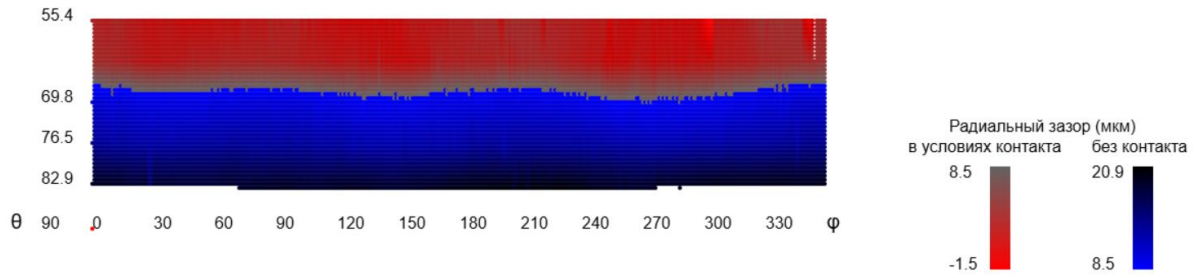


Рисунок В.25 – Развертка сферической поверхности крышки №5 до притирки

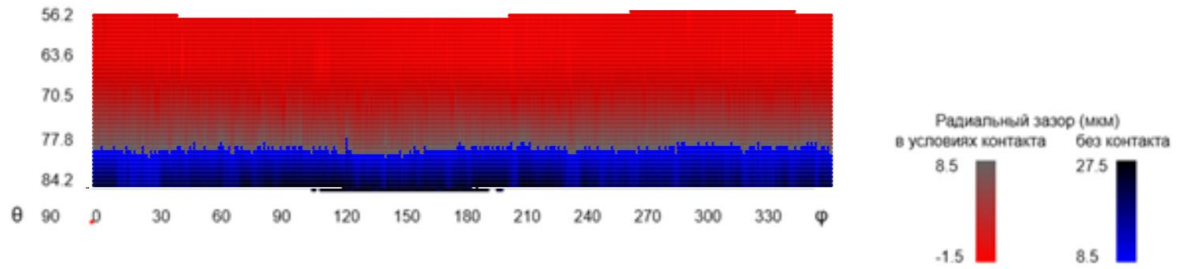


Рисунок В.26 – Развертка сферической поверхности крышки №5 после притирки

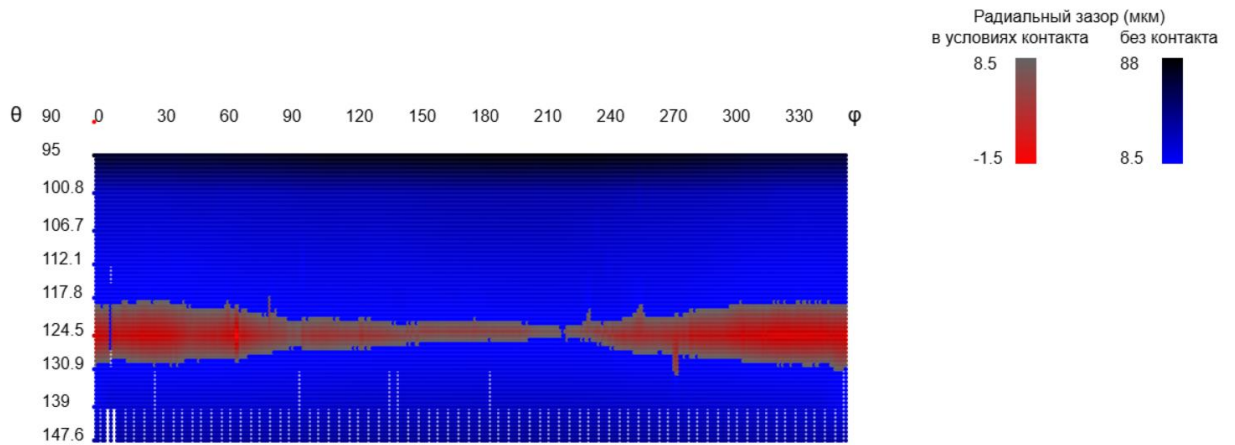


Рисунок В.27 – Развертка сферической поверхности подпятника №5 до притирки

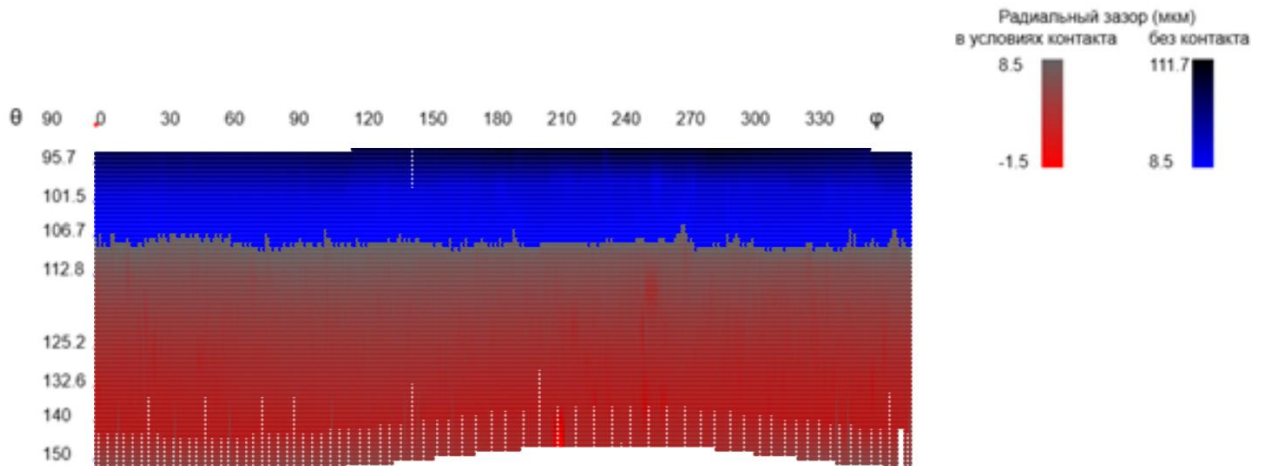


Рисунок В.28 – Развертка сферической поверхности подпятника №5 после притирки

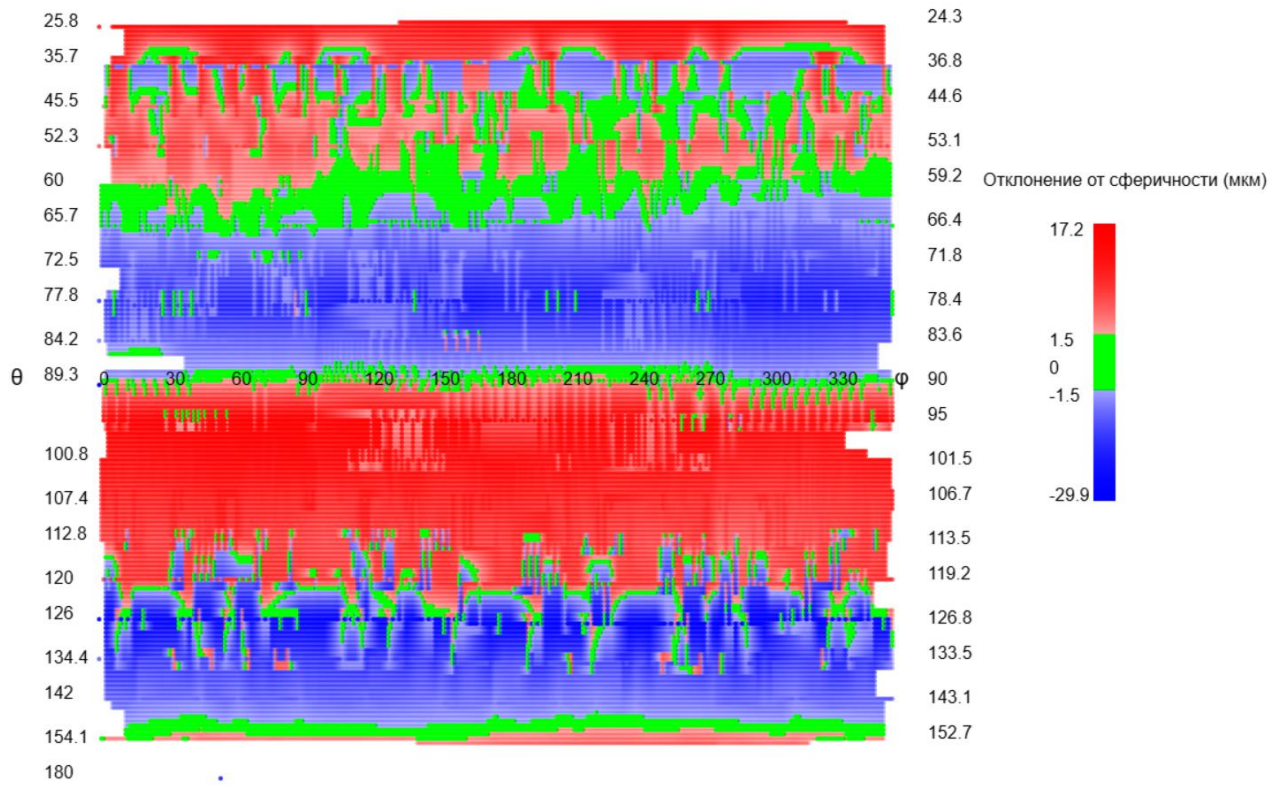


Рисунок В.29 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №5 до притирки

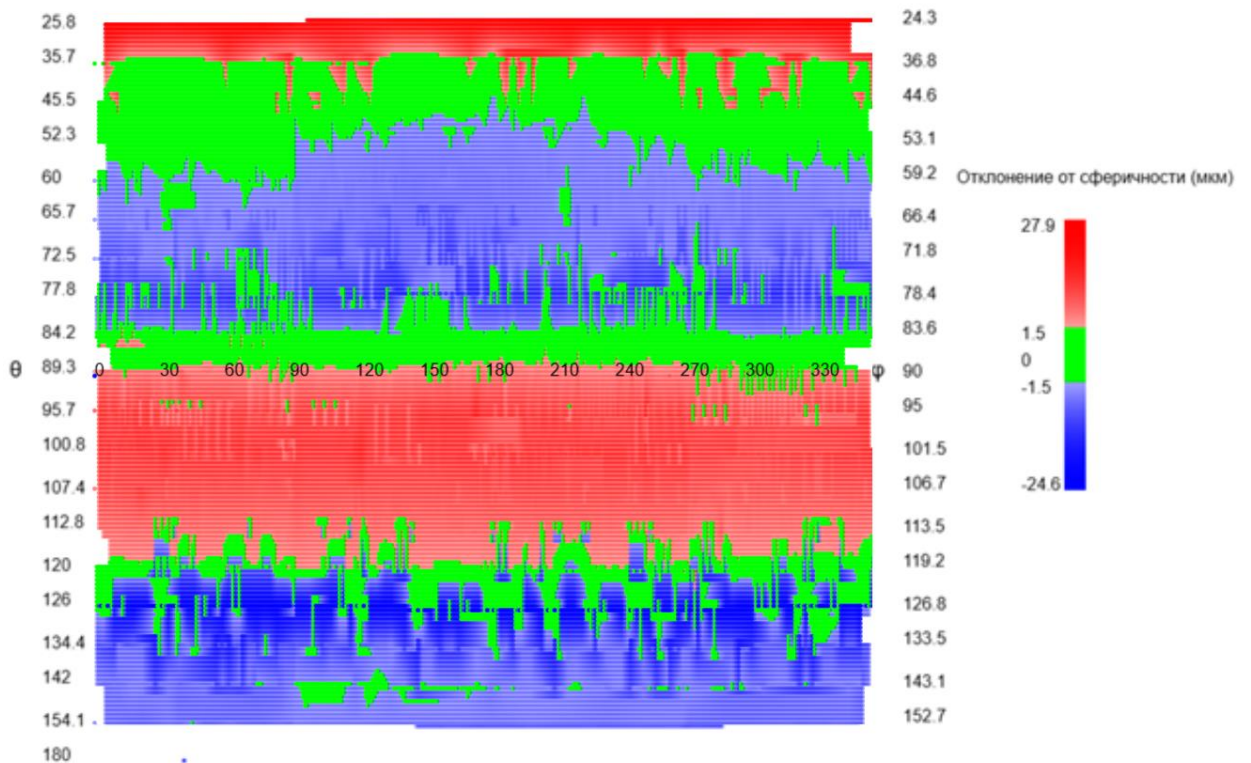


Рисунок В.30 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №5 после притирки

Таблица В.1 – Геометрические параметры образца шарнира №1

Деталь шарнира	Время, %	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	0	10,0368	46	38,2
	25	10,0367	47,3	41,3
	50	10,0366	49,1	42,6
	75	10,0365	50,8	43,9
	100	10,0364	52,2	39,3
Подпятник	0	10,0367	67,8	48,6
	25	10,0379	67	45,0
	50	10,0355	66,4	41,2
	75	10,0340	64,2	39,5
	100	10,0336	58,6	52,1
Шаровой палец	0	9,9800	37,5	10,0
	25	9,9794	28,6	10,3
	50	9,9789	40,9	10
	75	9,9785	42,4	10,6
	100	9,9780	42,2	10,2

Таблица В.2 – Геометрические параметры образца шарнира №2

Деталь шарнира	Время, %	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	0	10,0367	27,8	43,7
	25	10,0363	32,6	24,1
	50	10,0353	45,6	19,3
	75	10,0351	46,5	18,0
	100	10,0346	47,5	26,1
Подпятник	0	10,0296	49,9	29,6
	25	10,0303	48,2	29,3
	50	10,0309	45,2	48,6
	75	10,0300	41,9	69,1
	100	10,0294	65,2	33,6
Шаровой палец	0	10,0041	54,6	12,2
	25	10,0027	53,9	14,1
	50	10,0014	53,0	16,6
	75	10,0001	52,2	13,2
	100	9,9989	53,1	14,5

Таблица В.3 – Геометрические параметры образца шарнира №3

Деталь шарнира	Время, %	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	0	10,0472	26,8	19,3
	25	10,0441	30,8	11,5
	50	10,0423	42,4	14,1
	75	10,0401	37,4	20,5
	100	10,0379	33,2	23,3
Подпятник	0	10,0237	33,2	60,8
	25	10,0243	30,4	60,3
	50	10,0240	28,9	53,5
	75	10,0232	29,5	57,9
	100	10,0209	30,7	47,8
Шаровой палец	0	9,9853	41,3	9,2
	25	9,9835	41,7	11,6
	50	9,9817	42,9	9,5
	75	9,9801	43,7	15,3
	100	9,9788	45,8	14,5

Таблица В.4 – Геометрические параметры образца шарнира №4

Деталь шарнира	Время, %	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	0	10,0187	30,4	45,0
	25	10,0162	34,6	58,7
	50	10,0143	38,2	53,1
	75	10,0128	41,3	47,2
	100	10,0119	42,9	36,8
Подпятник	0	10,0212	38,2	42,1
	25	10,0208	38,9	43,6
	50	10,0198	39,8	40,7
	75	10,0189	40,6	38,8
	100	10,0172	46,4	44,5
Шаровой палец	0	9,9776	25,4	14,7
	25	9,9765	26,9	13,0
	50	9,9750	27,8	11,8
	75	9,9743	28,4	13,3
	100	9,9735	33,7	14,1

Таблица Б.5 – Геометрические параметры образца шарнира №5

Деталь шарнира	Время, %	Параметр сферической поверхности		
		Средний радиус, мм	Отклонение от сферичности, мкм	Относительная площадь пятна контакта, %
Крышка	0	10,0319	61,9	36,2
	25	10,0309	62,8	40,9
	50	10,0298	63,5	44,2
	75	10,0288	54,6	45,1
	100	10,0265	44,9	80,8
Подпятник	0	10,0229	58,9	29,1
	25	10,0236	55,2	31,1
	50	10,0254	52,8	36,3
	75	10,0250	50,9	40,1
	100	10,0249	57,2	74,6
Шаровой палец	0	9,9762	35,5	14,3
	25	9,9756	34,8	13,2
	50	9,9749	34,4	10,4
	75	9,9743	33,7	8,7
	100	9,9738	35,2	27,8

Таблица Б.6 – Критерии сходимости результатов моделирования с результатами проведенного эксперимента

№ образца шарнира	Критерии сходимости, %						
	Средний радиус	Отклонение от сферичности	Относительная площадь пятна контакта	Топология пятна контакта	Форма пятна контакта	Расположение пятна контакта	Общая сходимость
1	99,94	84,30	86,47	90,82	79,10	96,06	89,45
2	99,96	78,97	94,20	85,69	87,47	93,03	89,89
3	99,98	88,47	92,07	86,29	84,81	90,89	90,42
4	99,91	83,30	87,60	93,09	90,25	93,43	91,26
5	99,86	83,83	96,37	87,97	86,70	88,34	90,51

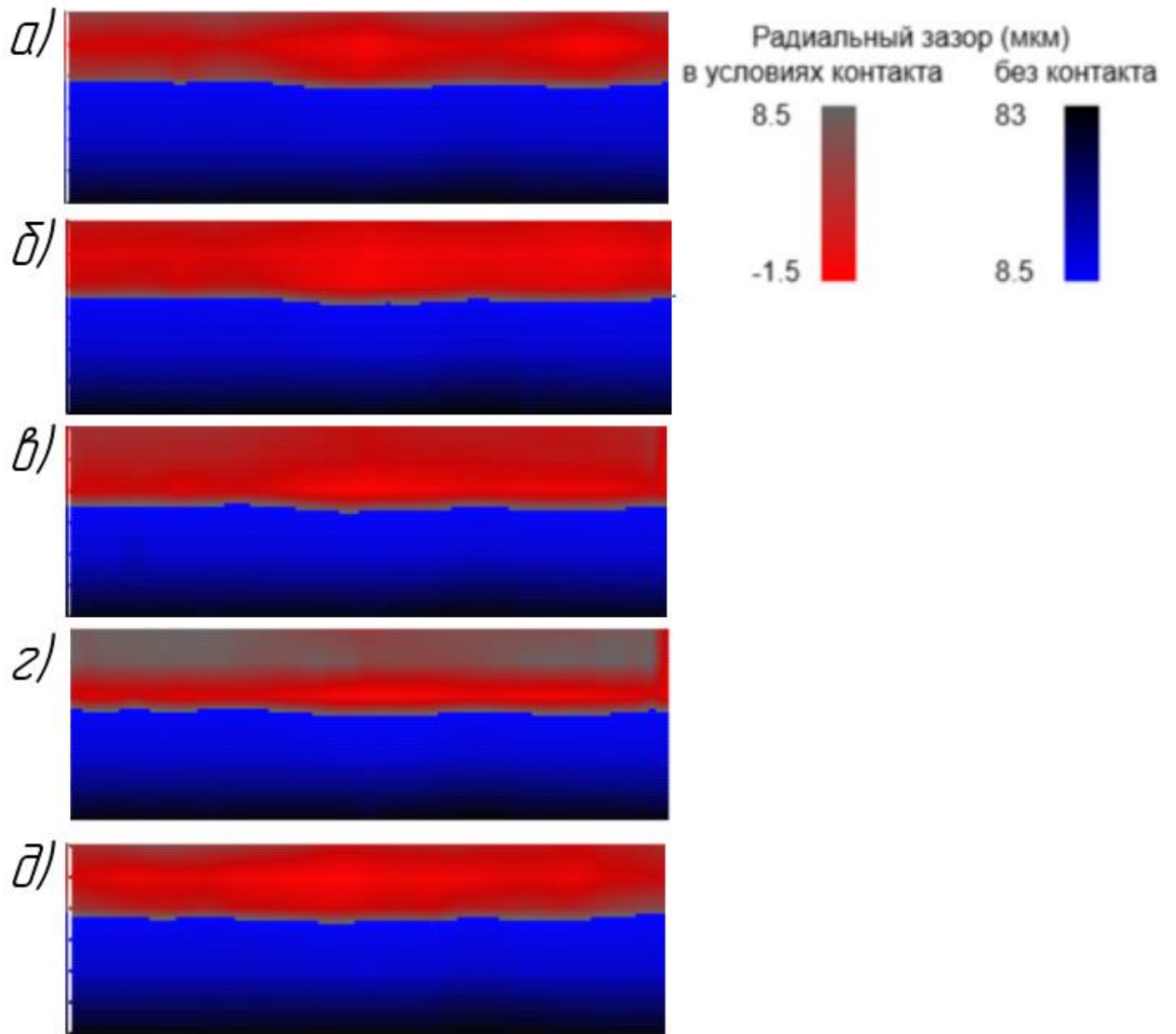


Рисунок В.31 – Развертка сферической поверхности крышки №1 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

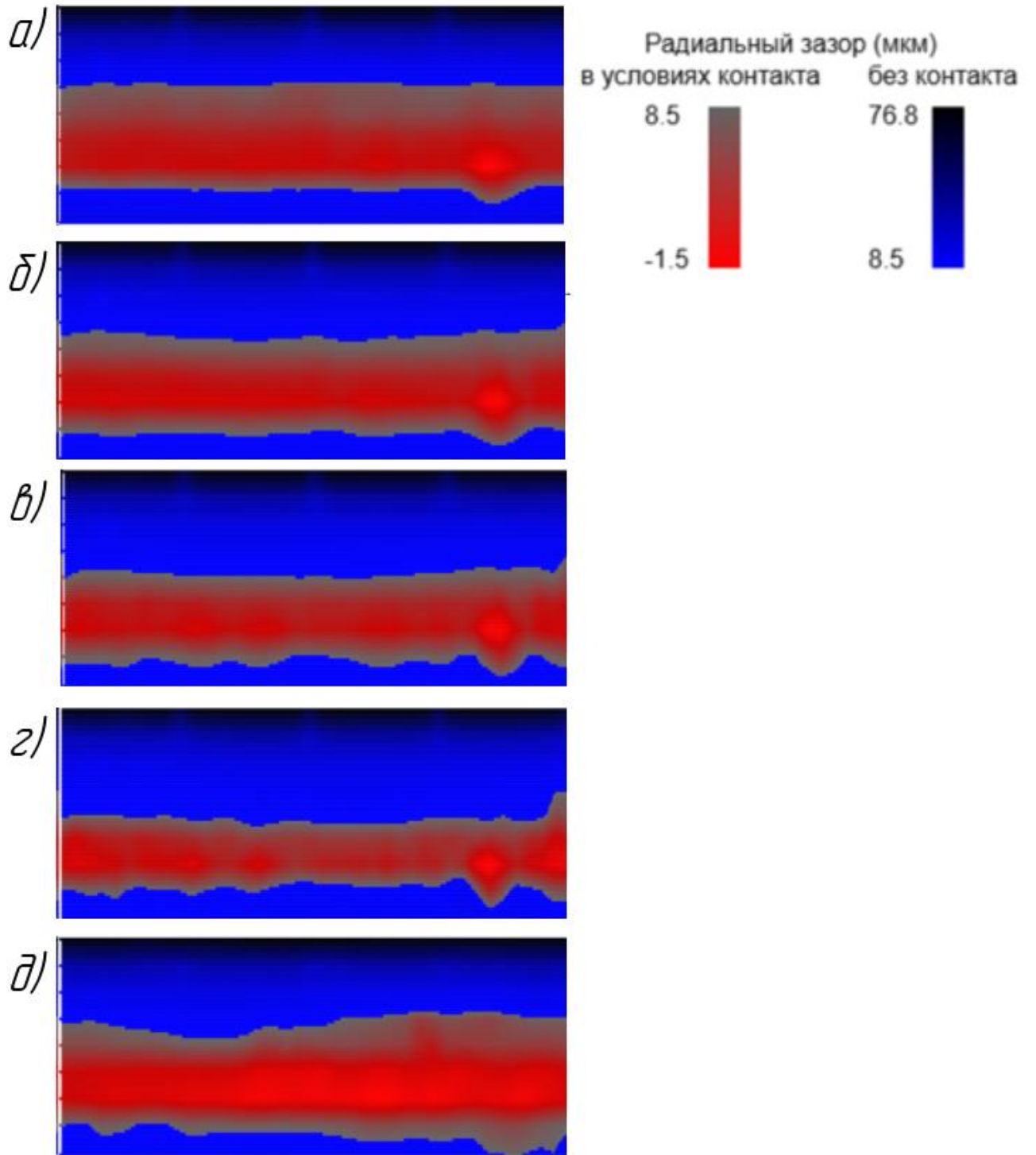


Рисунок В.32 – Развертка сферической поверхности подпятника №1 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

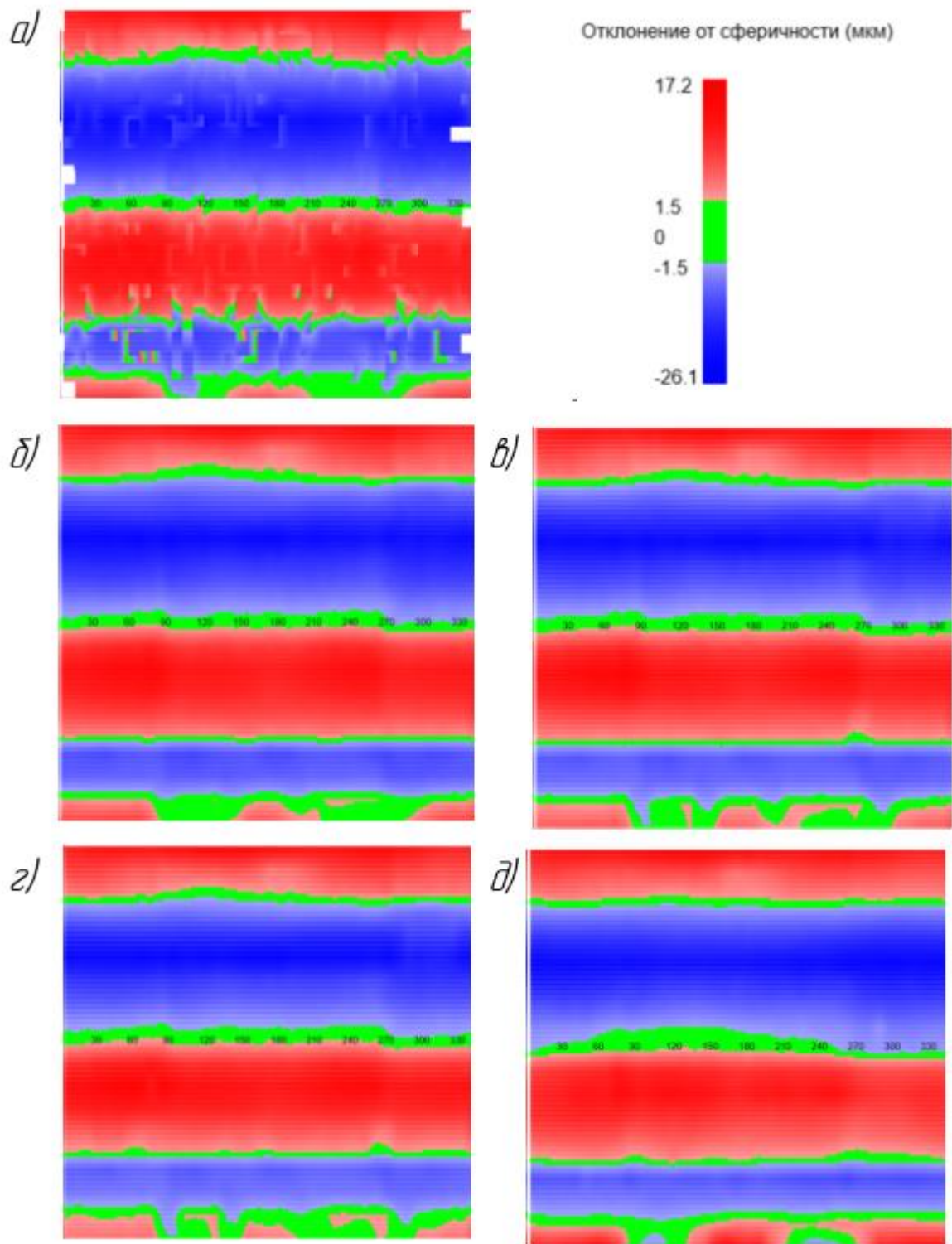


Рисунок В.33 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №1 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

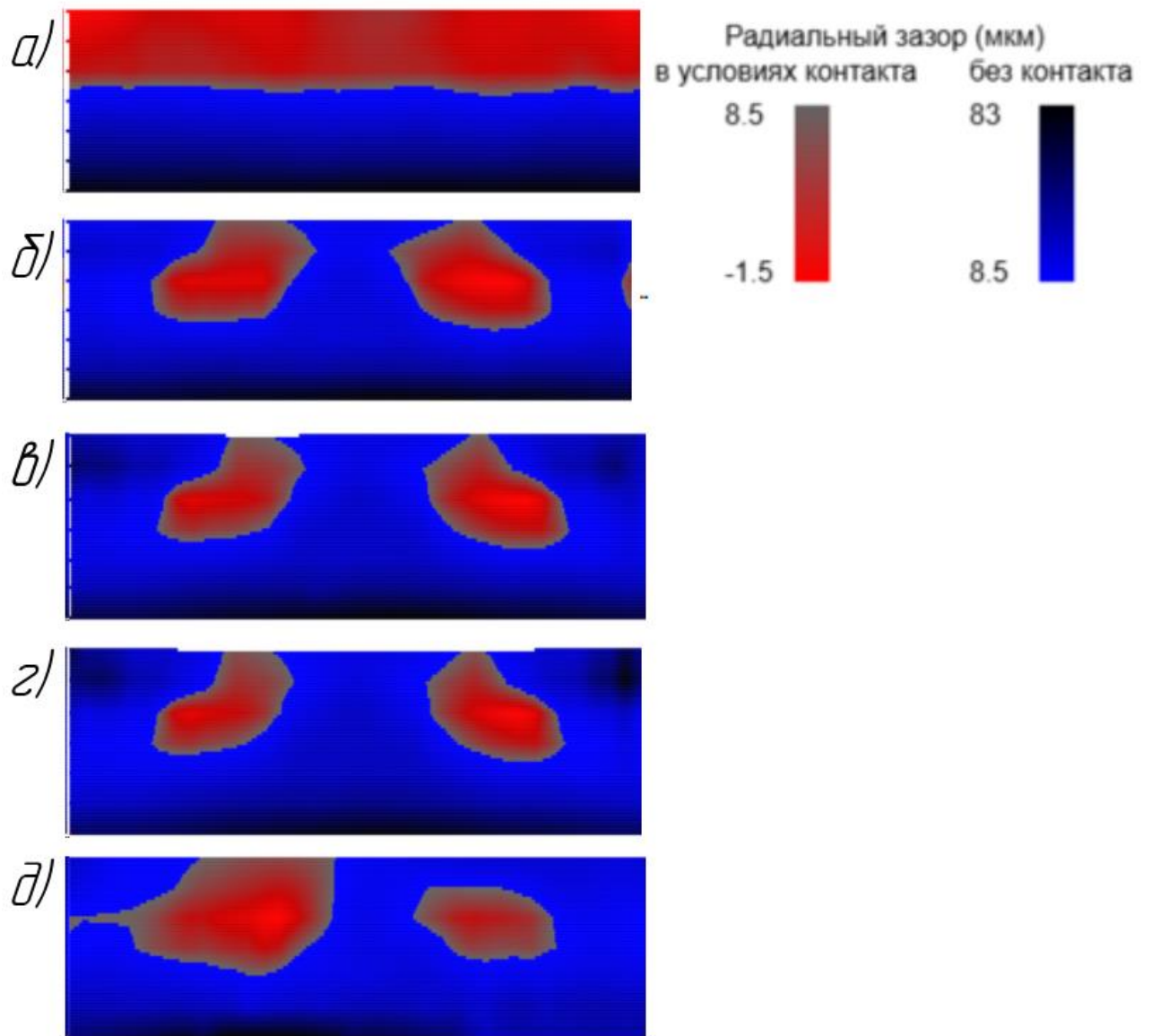


Рисунок В.34 – Развертка сферической поверхности крышки №2 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

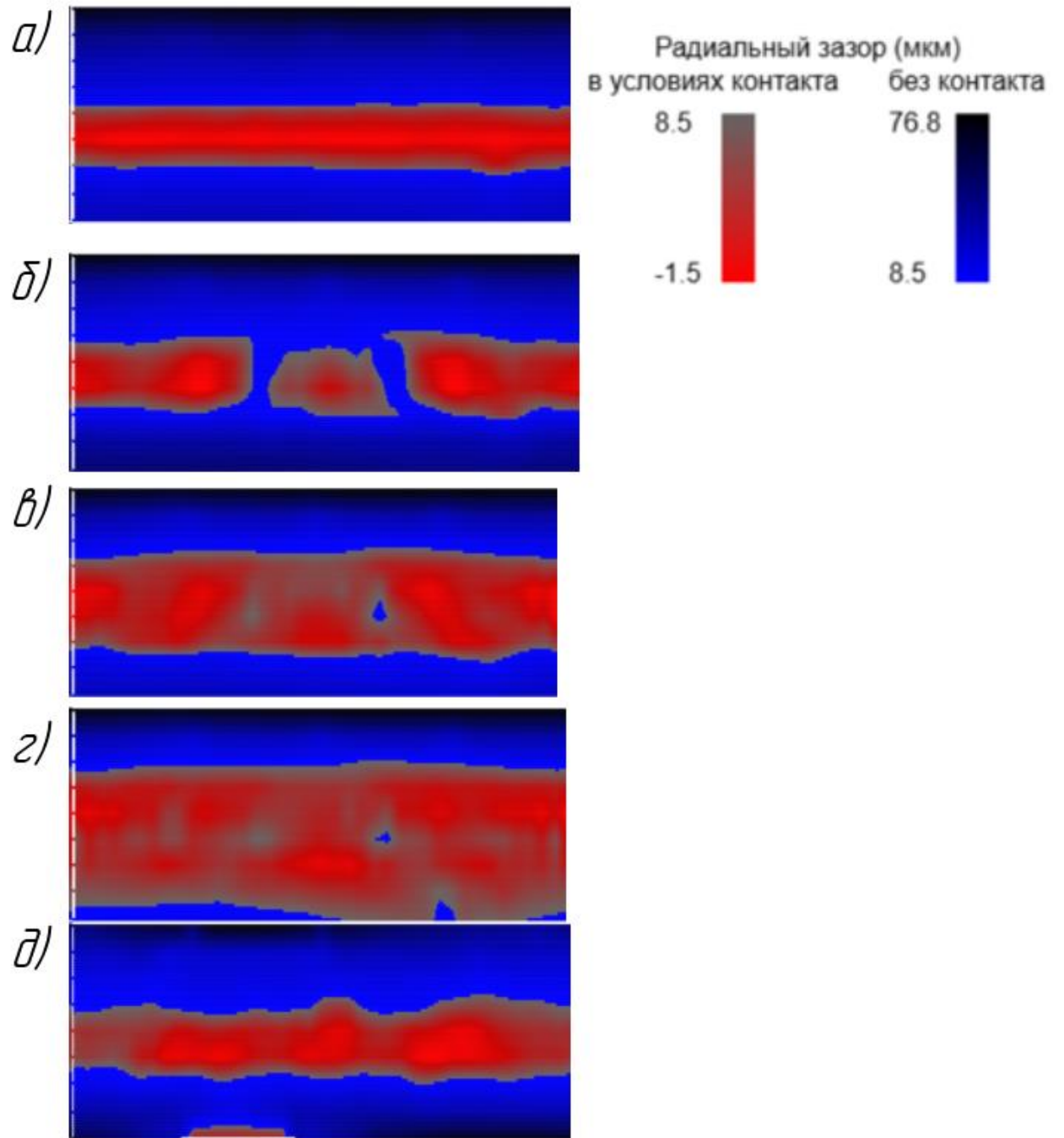


Рисунок В.35 – Развертка сферической поверхности подпятника №2 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

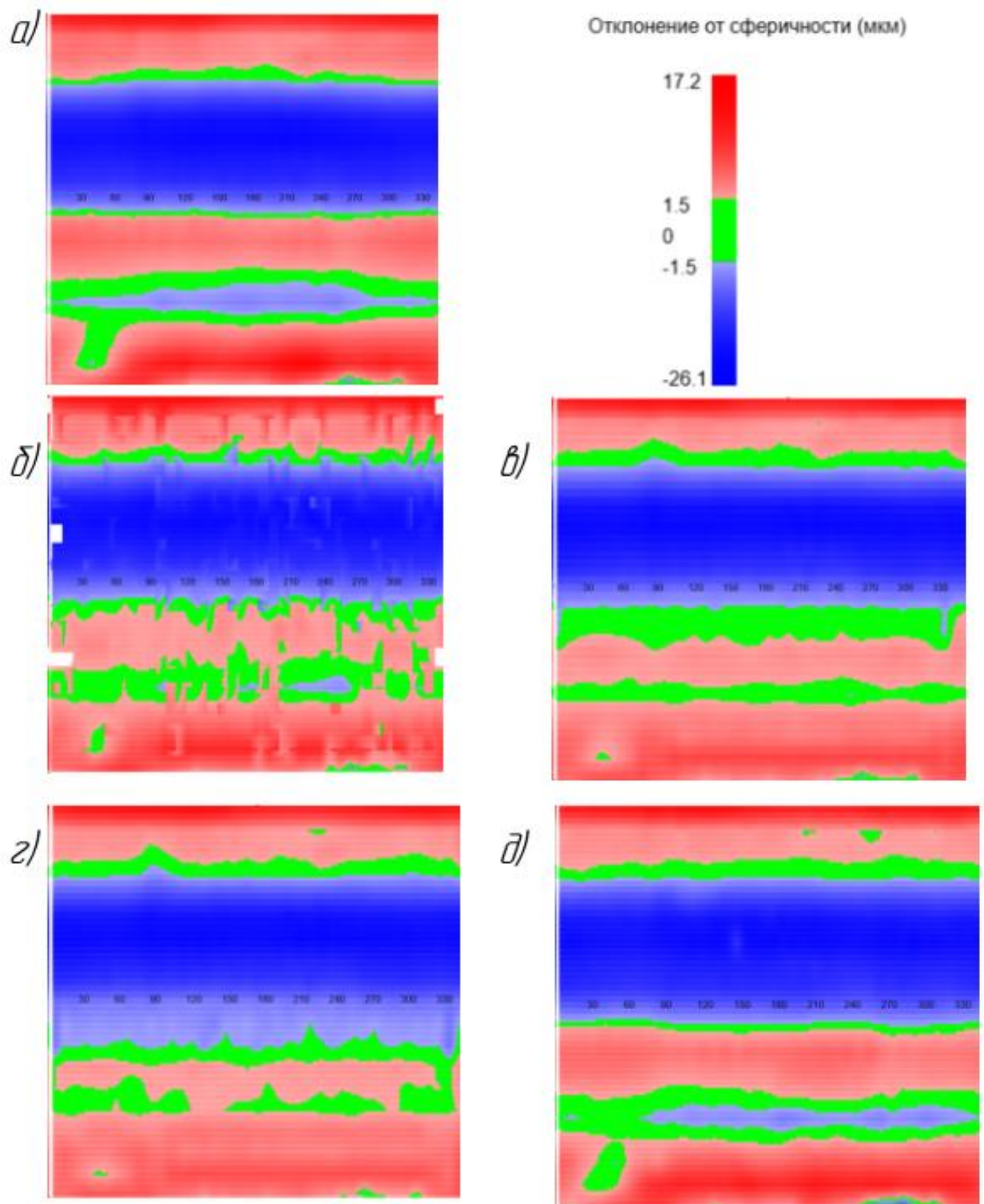


Рисунок В.36 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №2 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

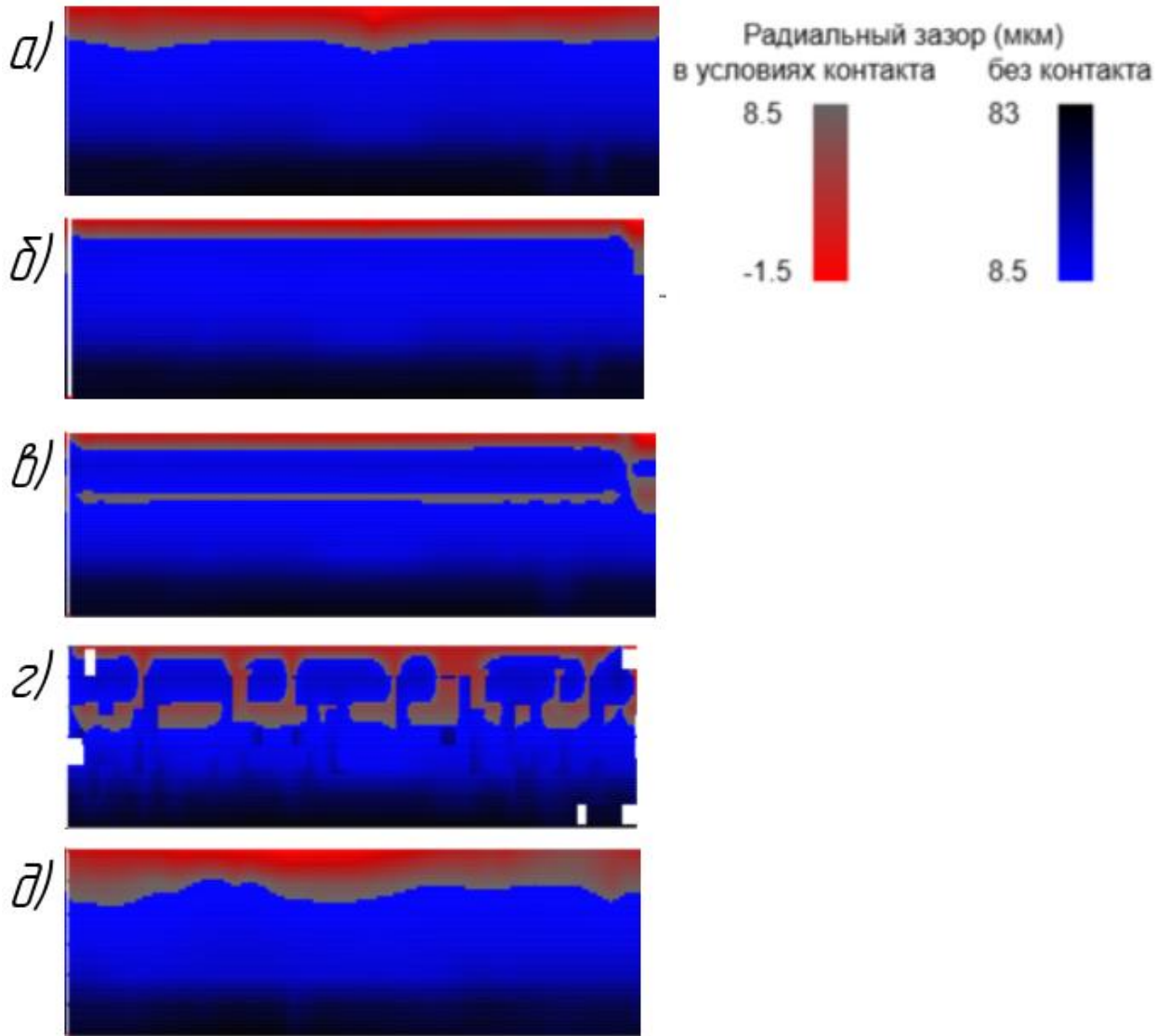


Рисунок В.37 – Развертка сферической поверхности крышки №3 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

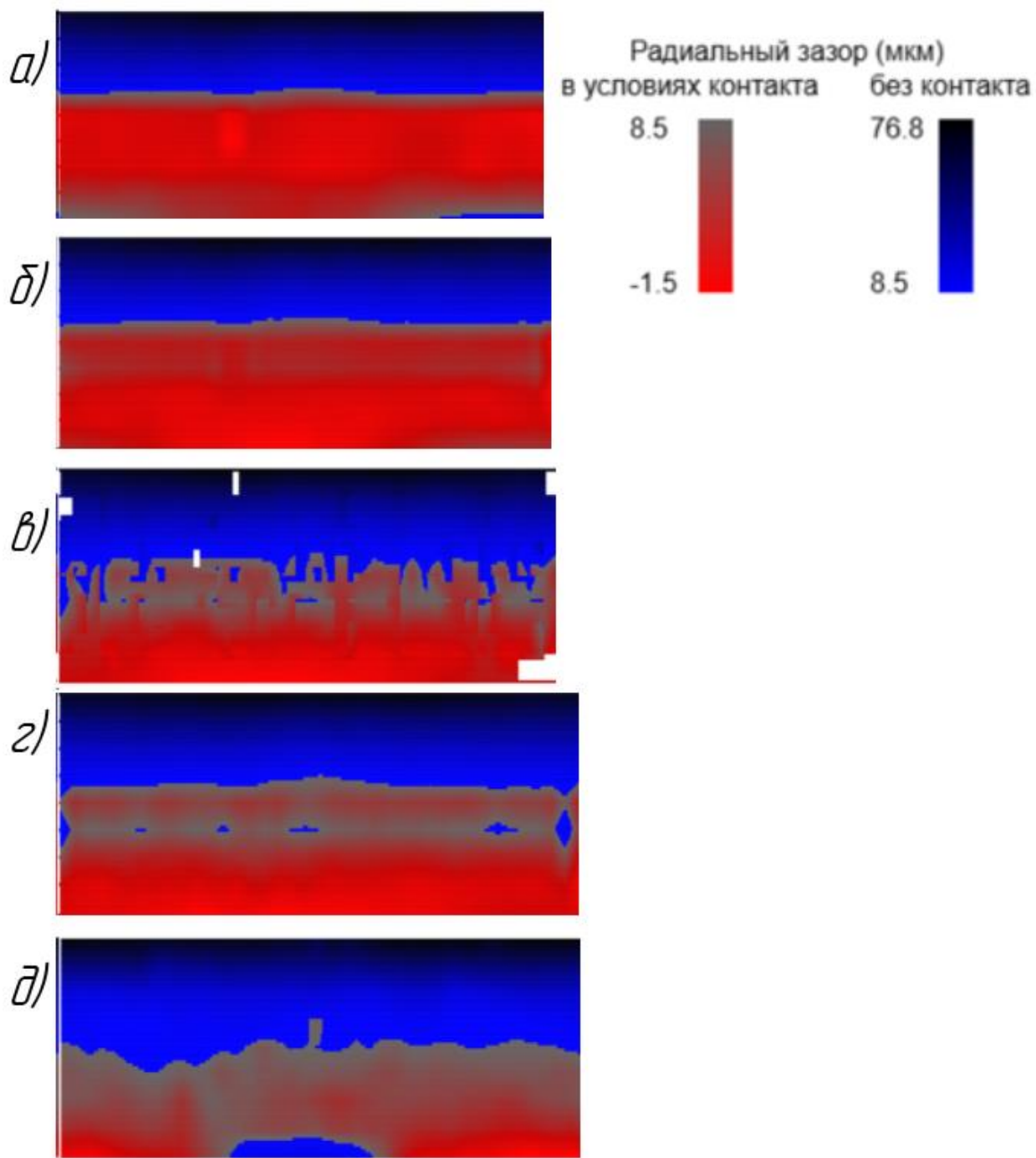


Рисунок В.38 – Развертка сферической поверхности подпятника №3 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

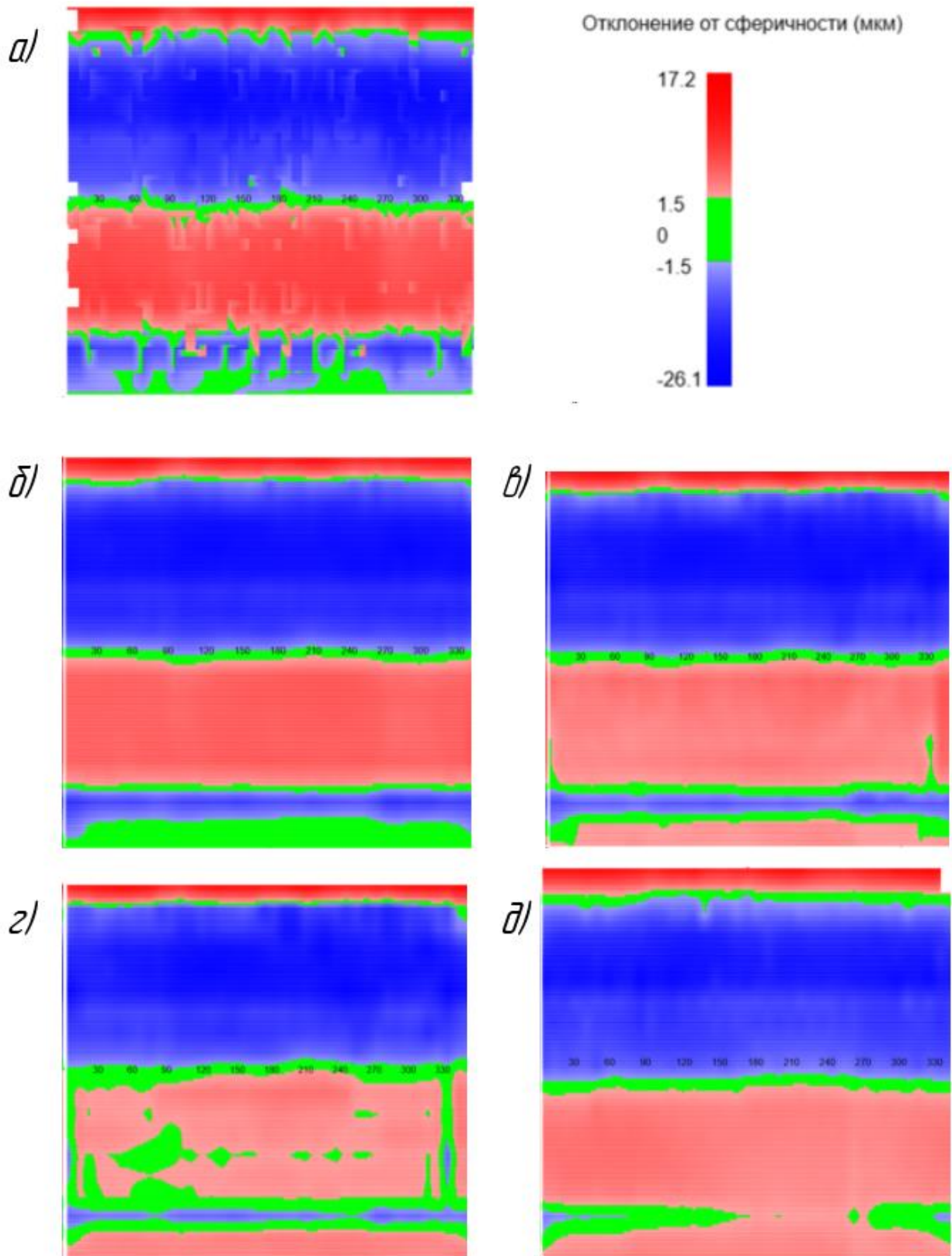


Рисунок В.39 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №3 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

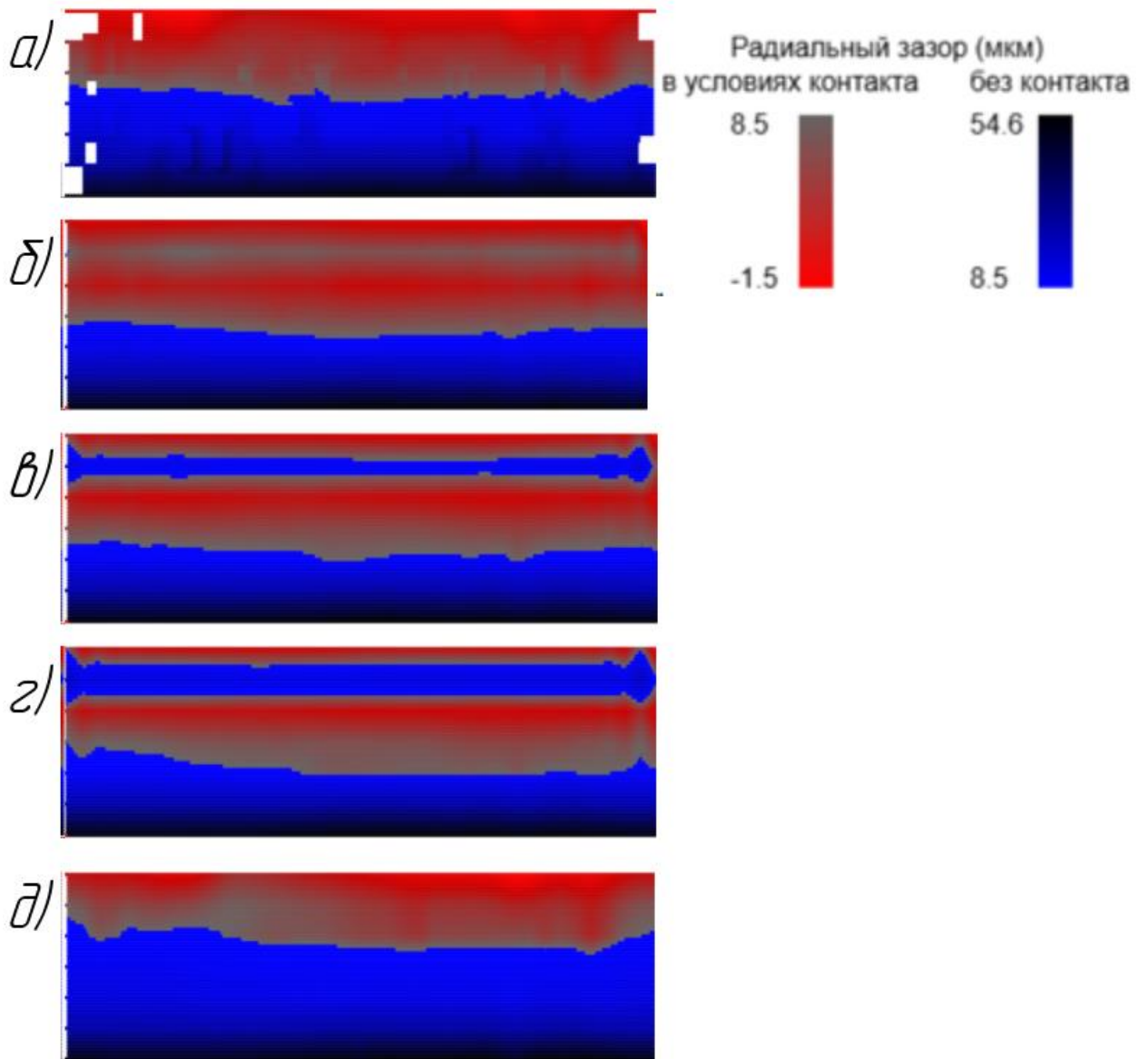


Рисунок В.40 – Развертка сферической поверхности крышки №4 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

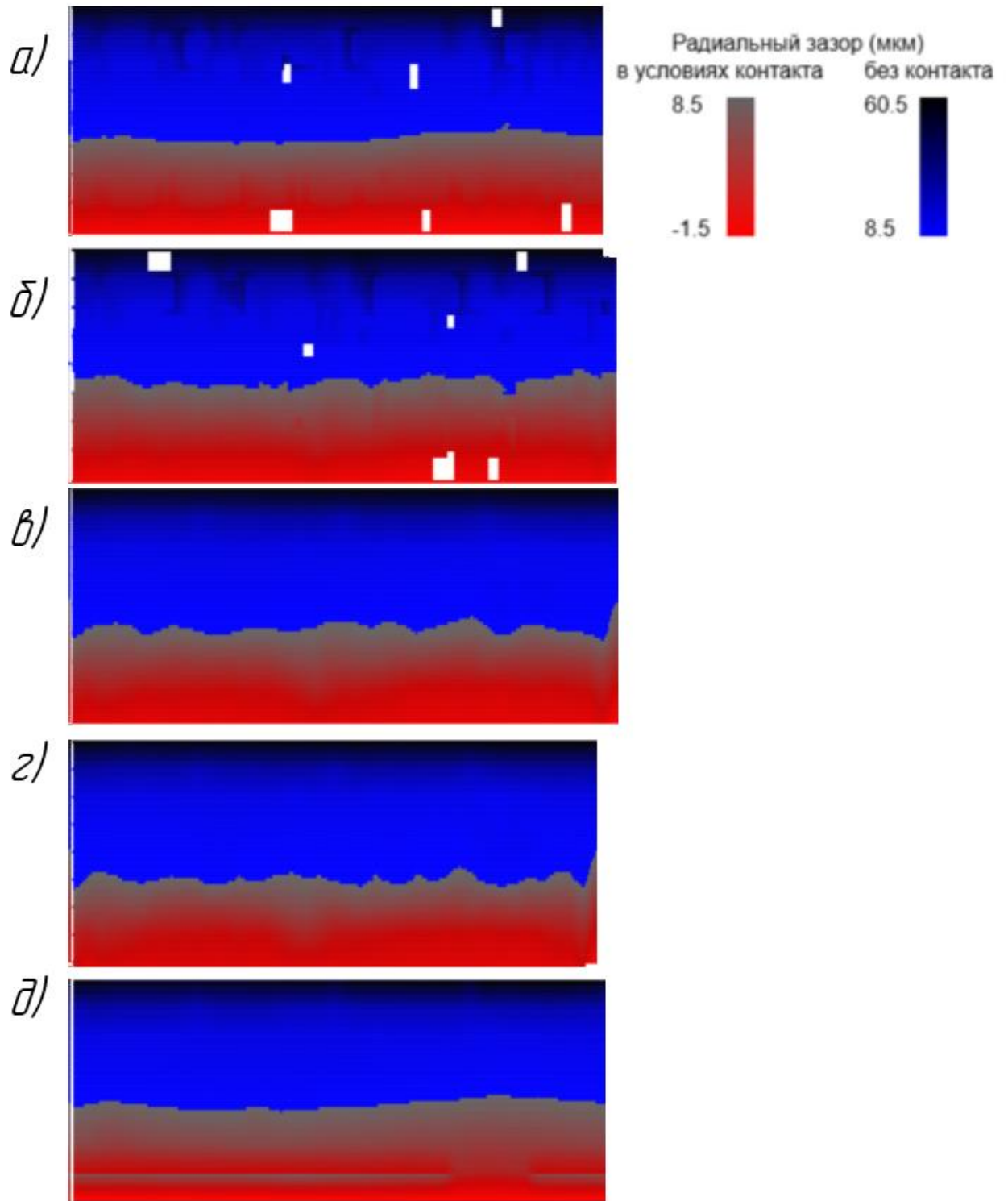


Рисунок В.41 – Развертка сферической поверхности подпятника №4 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

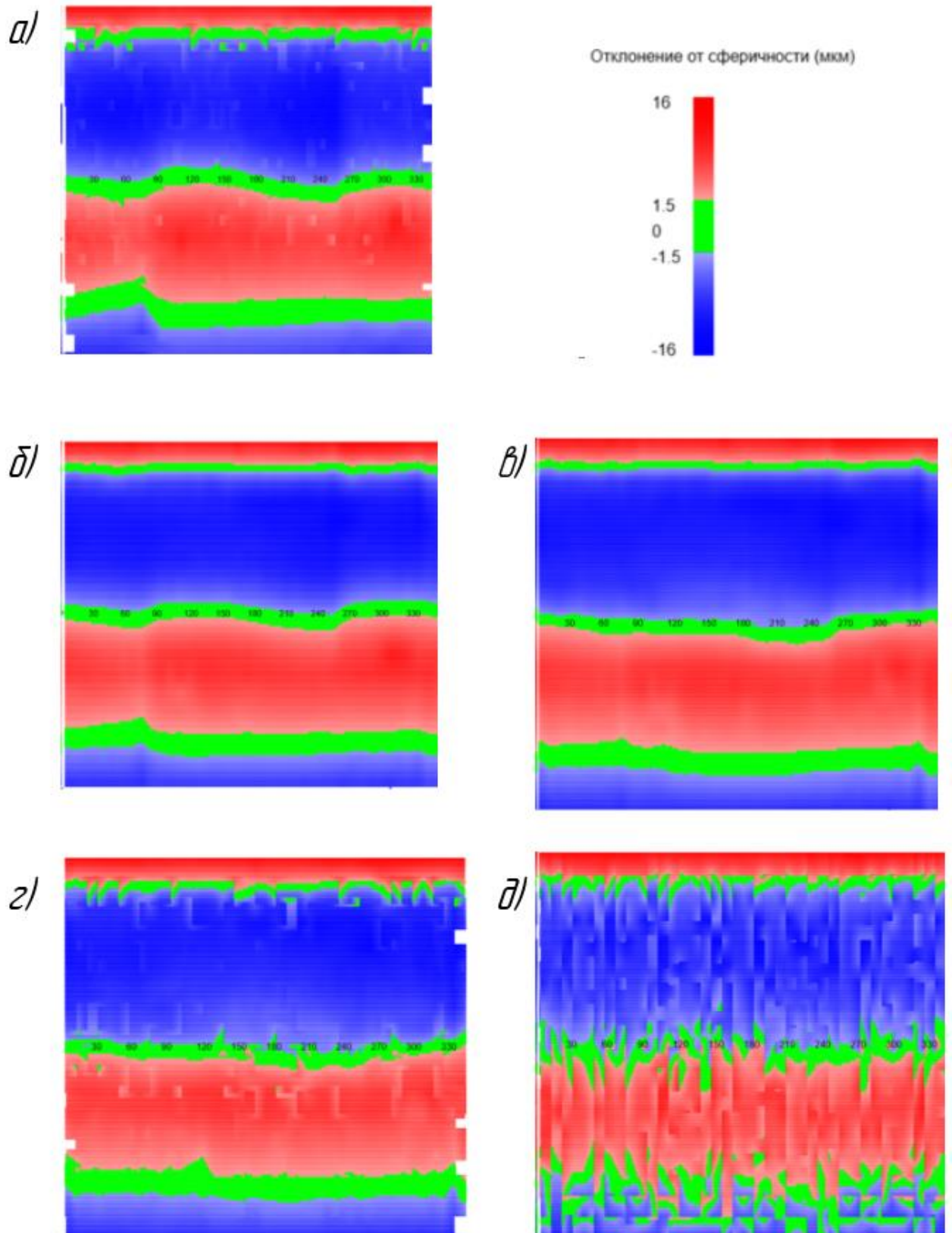


Рисунок В.42 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №4 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

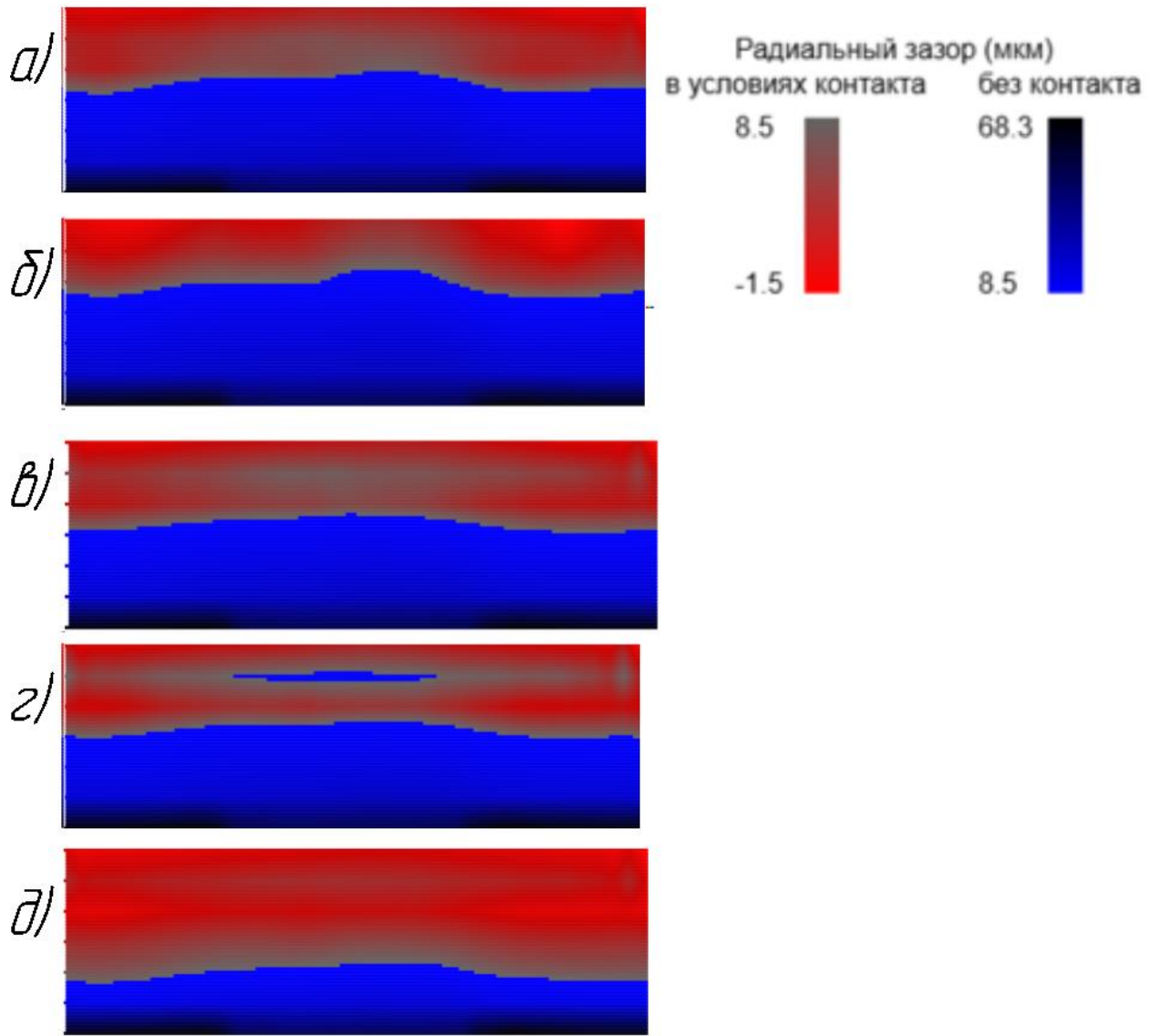


Рисунок В.43 – Развертка сферической поверхности крышки №5 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

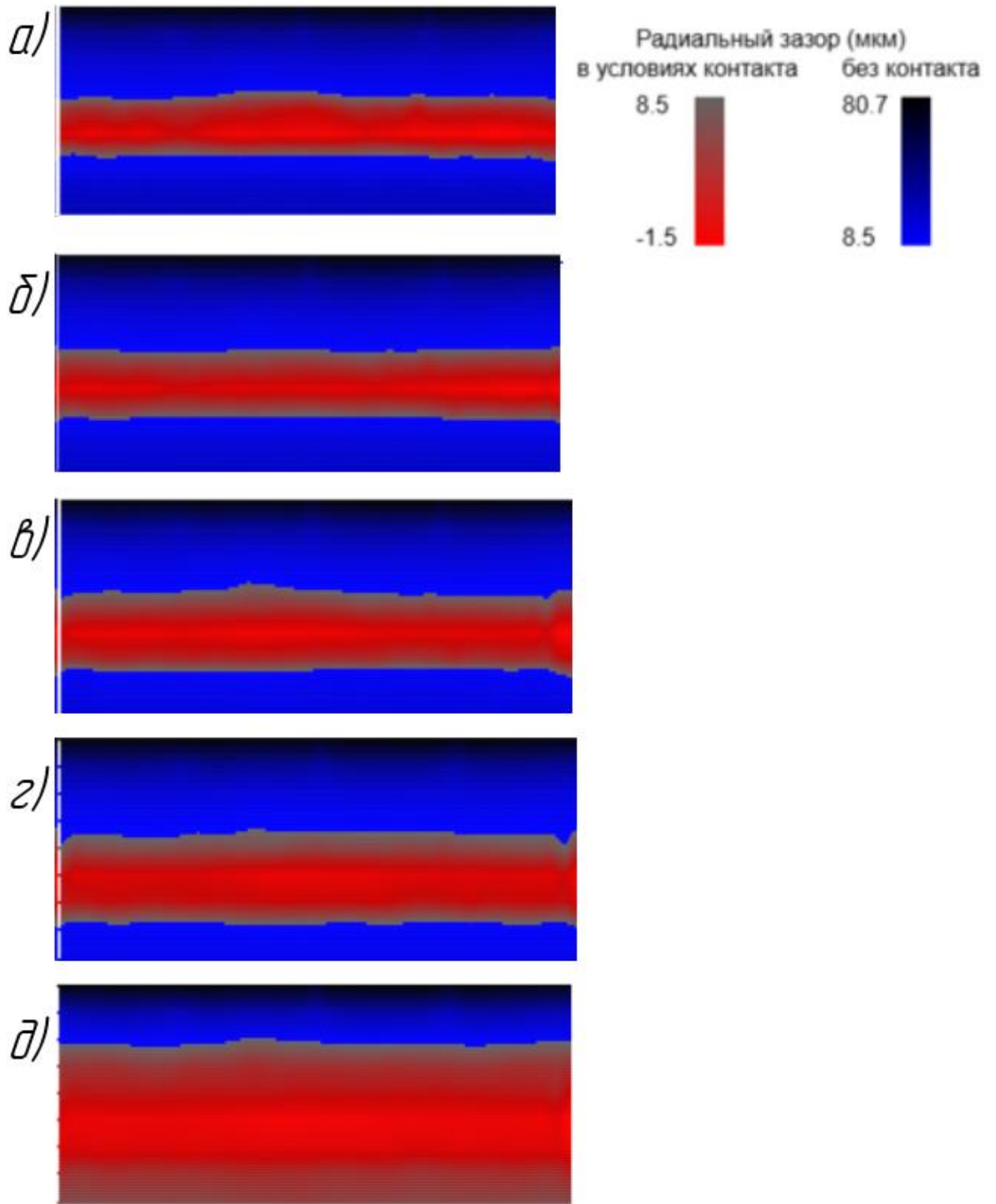


Рисунок В.44 – Развертка сферической поверхности подпятника №5 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

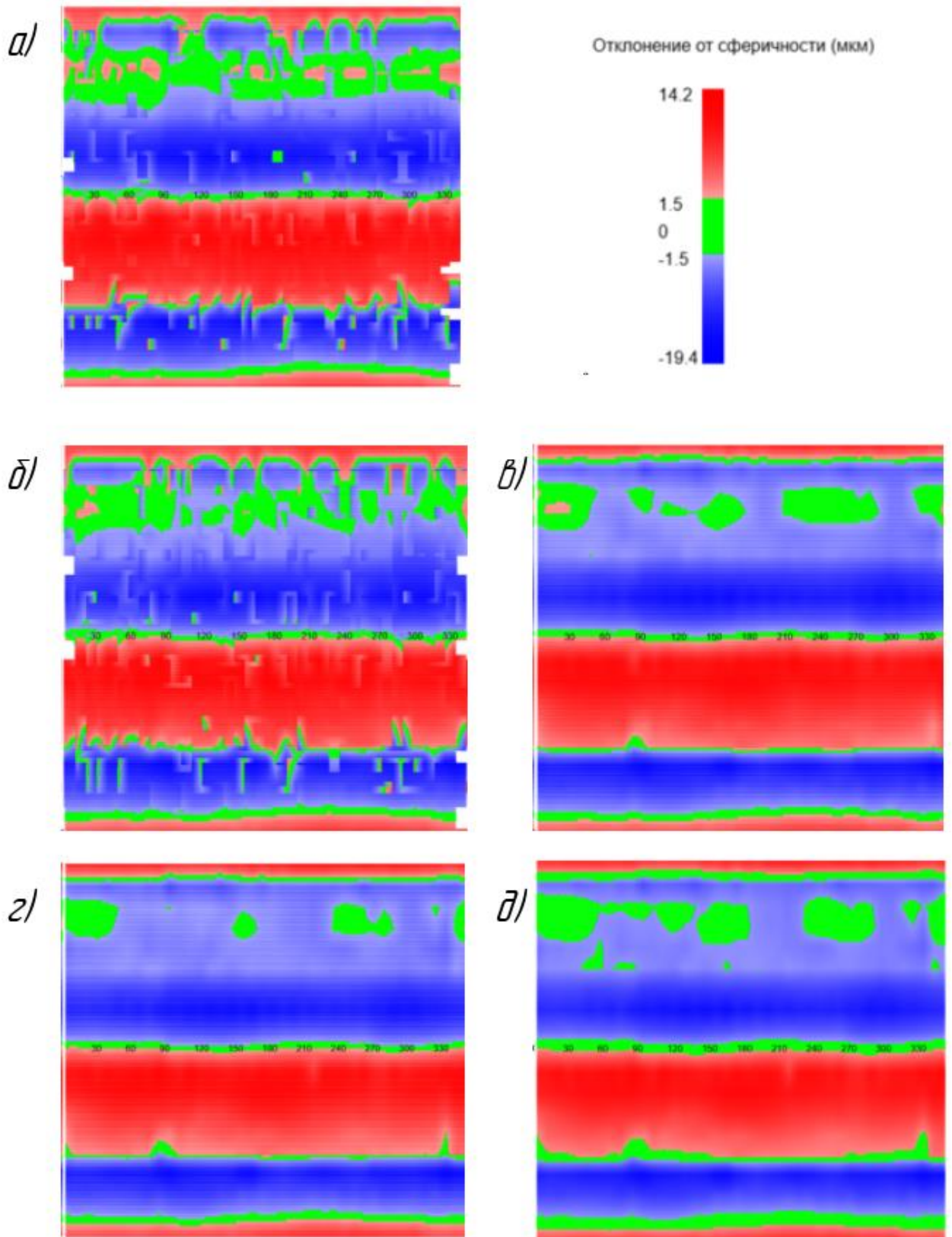


Рисунок В.45 – Развертка сферической поверхности шарового пальца №5 на стадии моделирования: а – 0%; б – 25%; в – 50%; г – 75%; д – 100%

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Экспериментальные данные по исследованию виброакустических сигналов при различных условиях трения в сферическом соединении

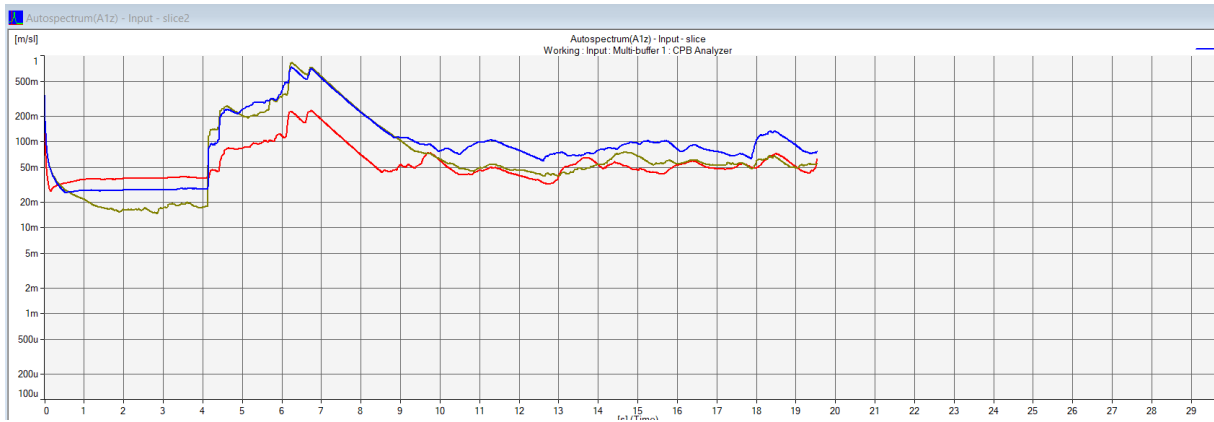


Рисунок Г.1 – Общие уровни ВА сигнала для опыта №9

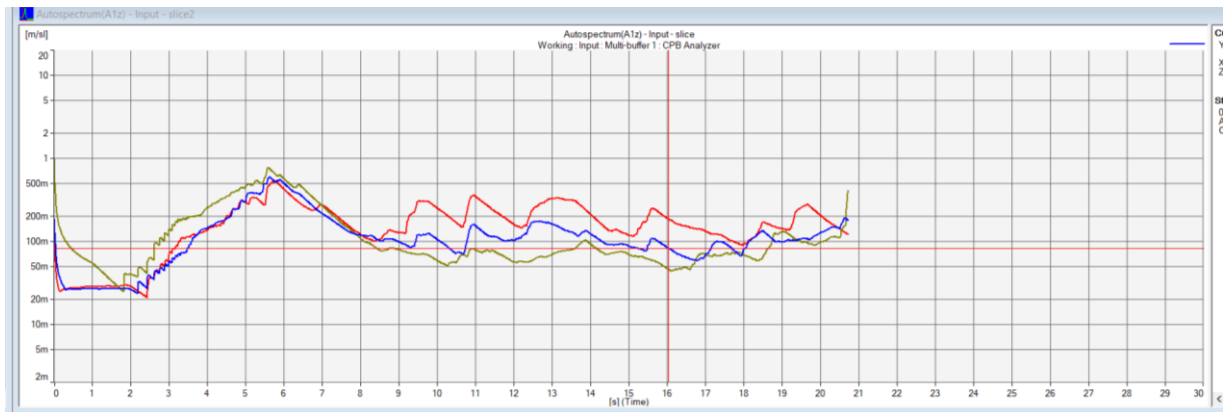


Рисунок Г.2 – Общие уровни ВА сигнала для опыта №24

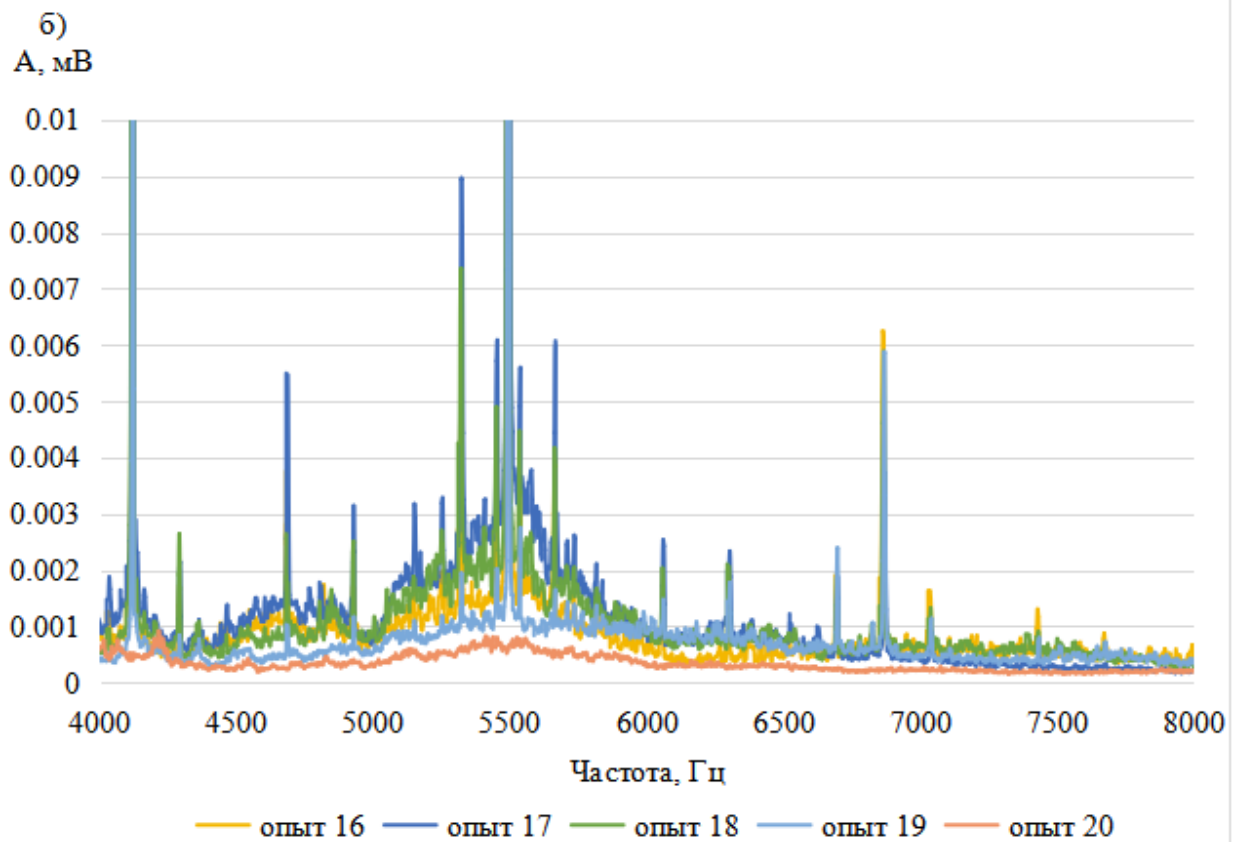
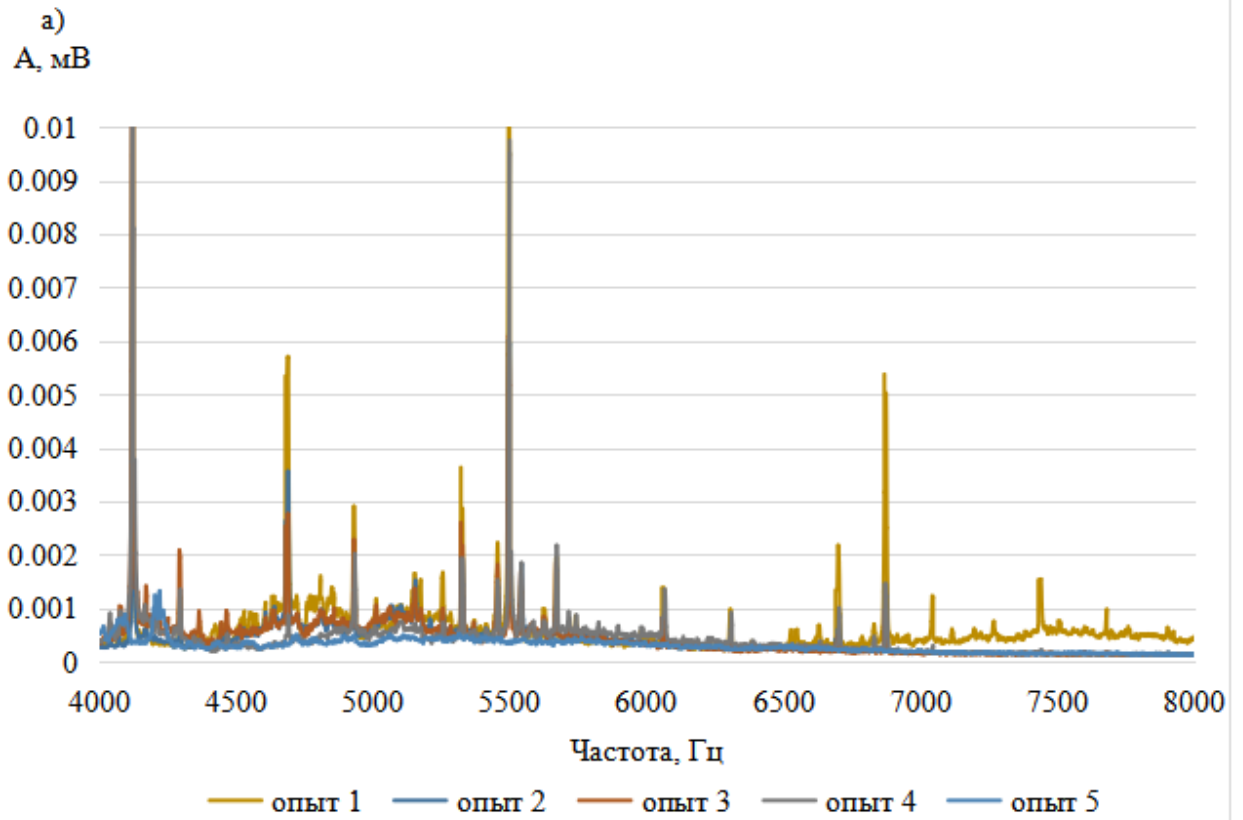


Рисунок Г.3 – Спектры рабочего процесса от 4 до 8 кГц (а) для образца шарнира №1, (б) для образца шарнира №2

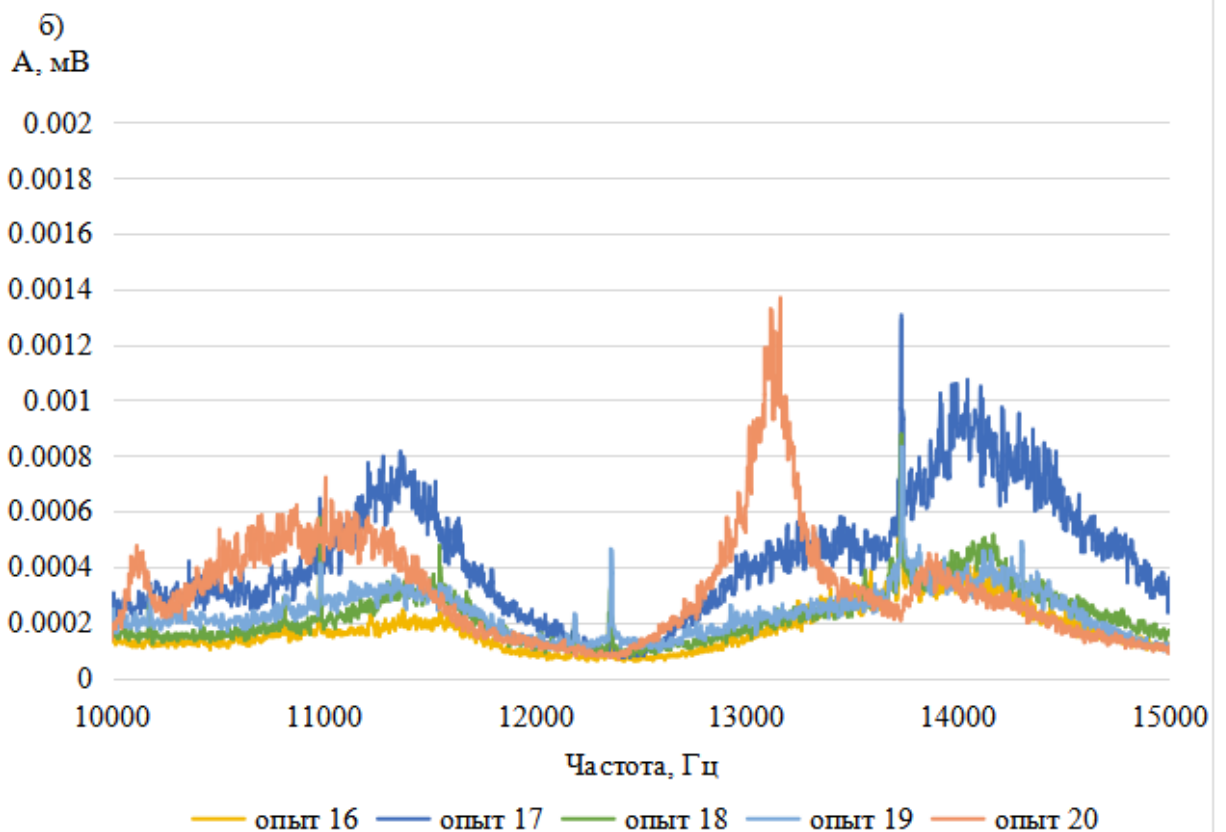
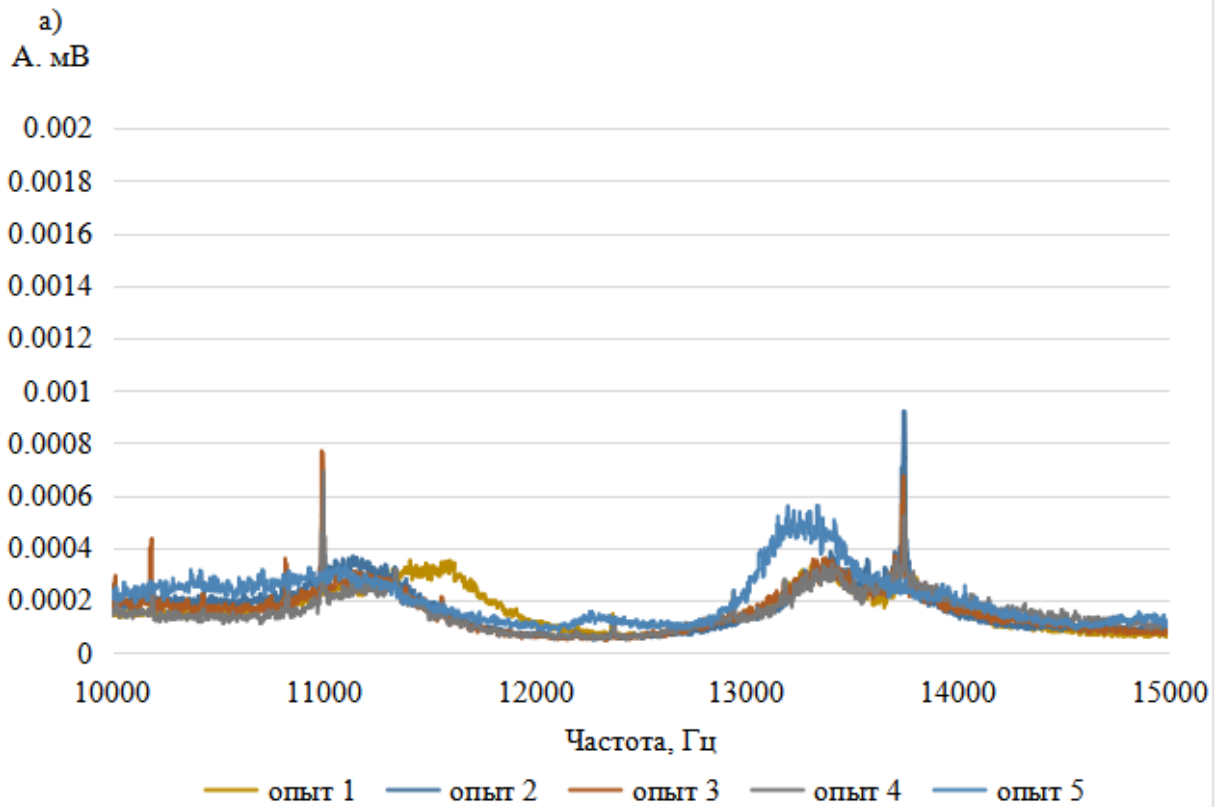


Рисунок Г.4 – Спектры рабочего процесса от 10 до 15 кГц (а) для образца шарнира №1, (б) для образца шарнира №2

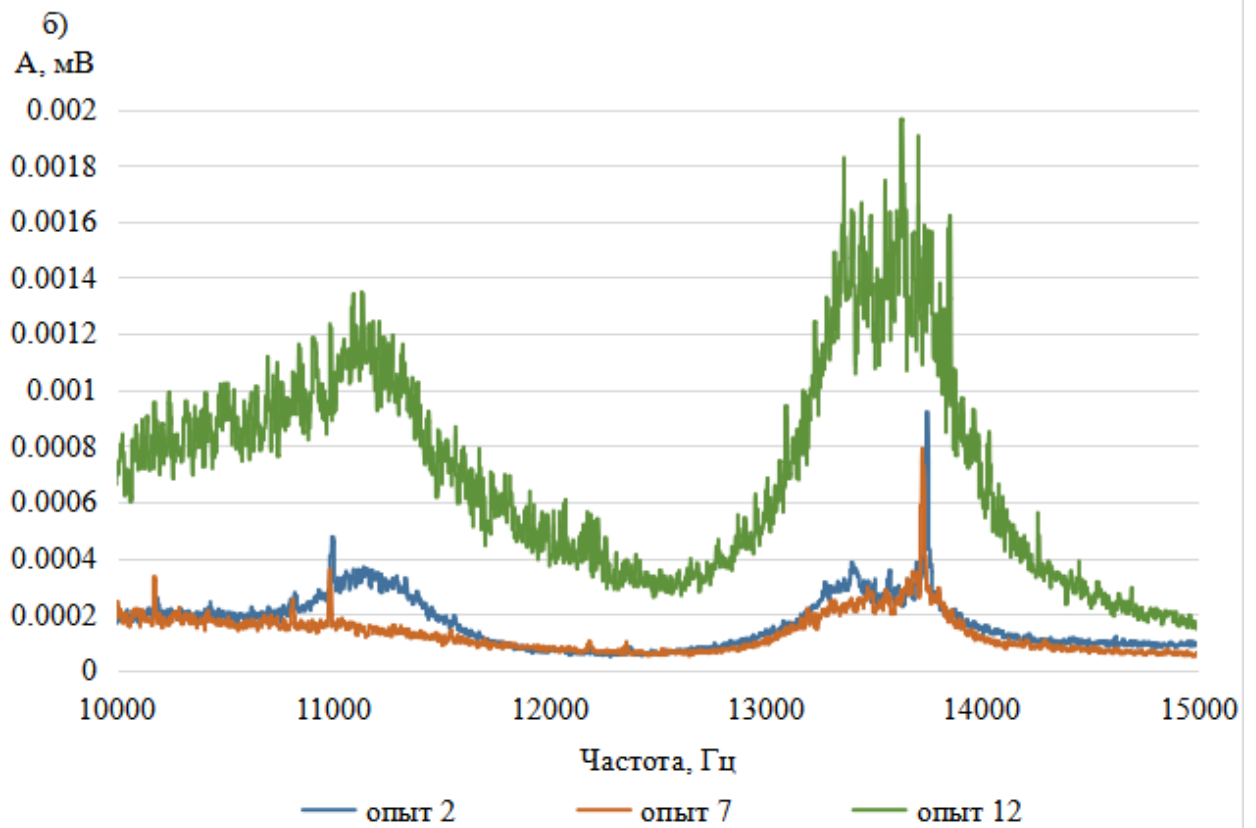
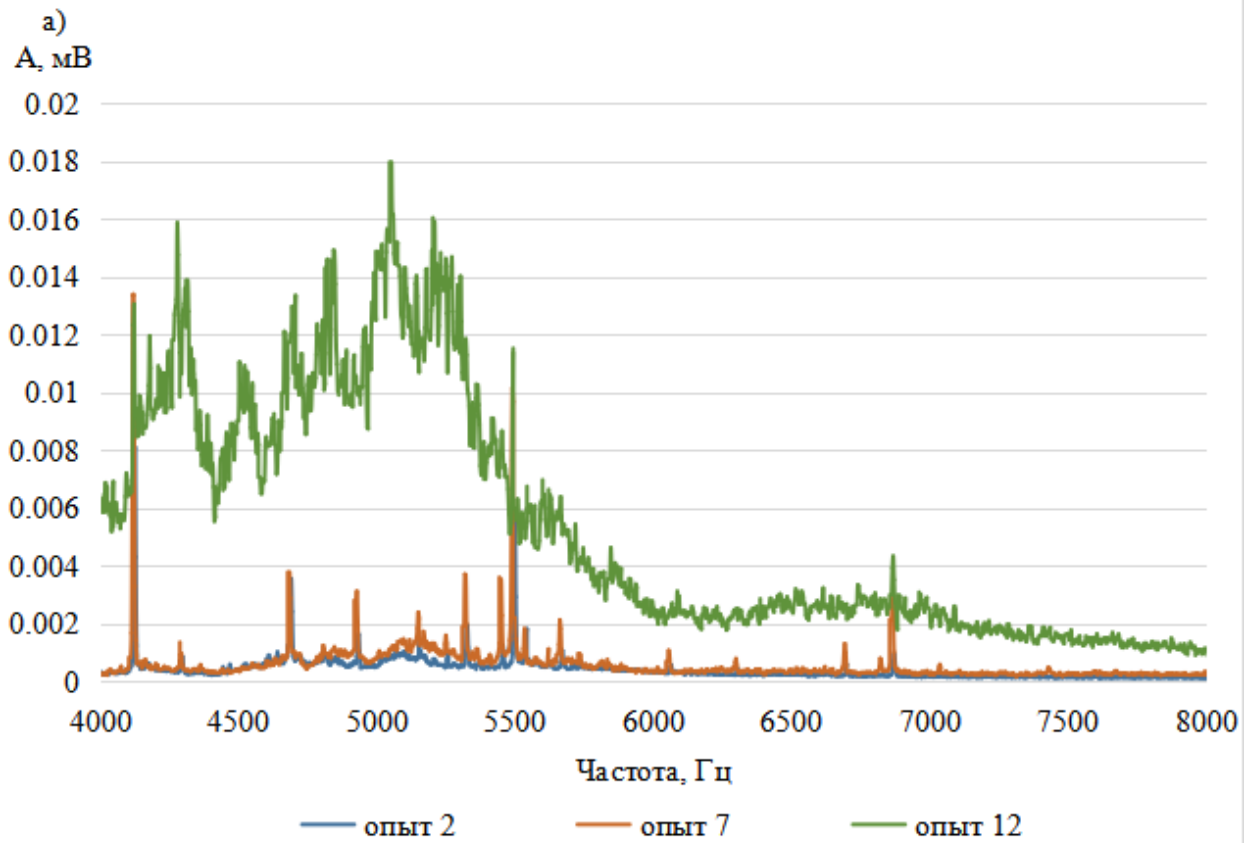


Рисунок Г.5 – Спектры рабочего процесса для образца шарнира №1 (а) от 4 до 8 кГц, (б) от 10 до 15 кГц

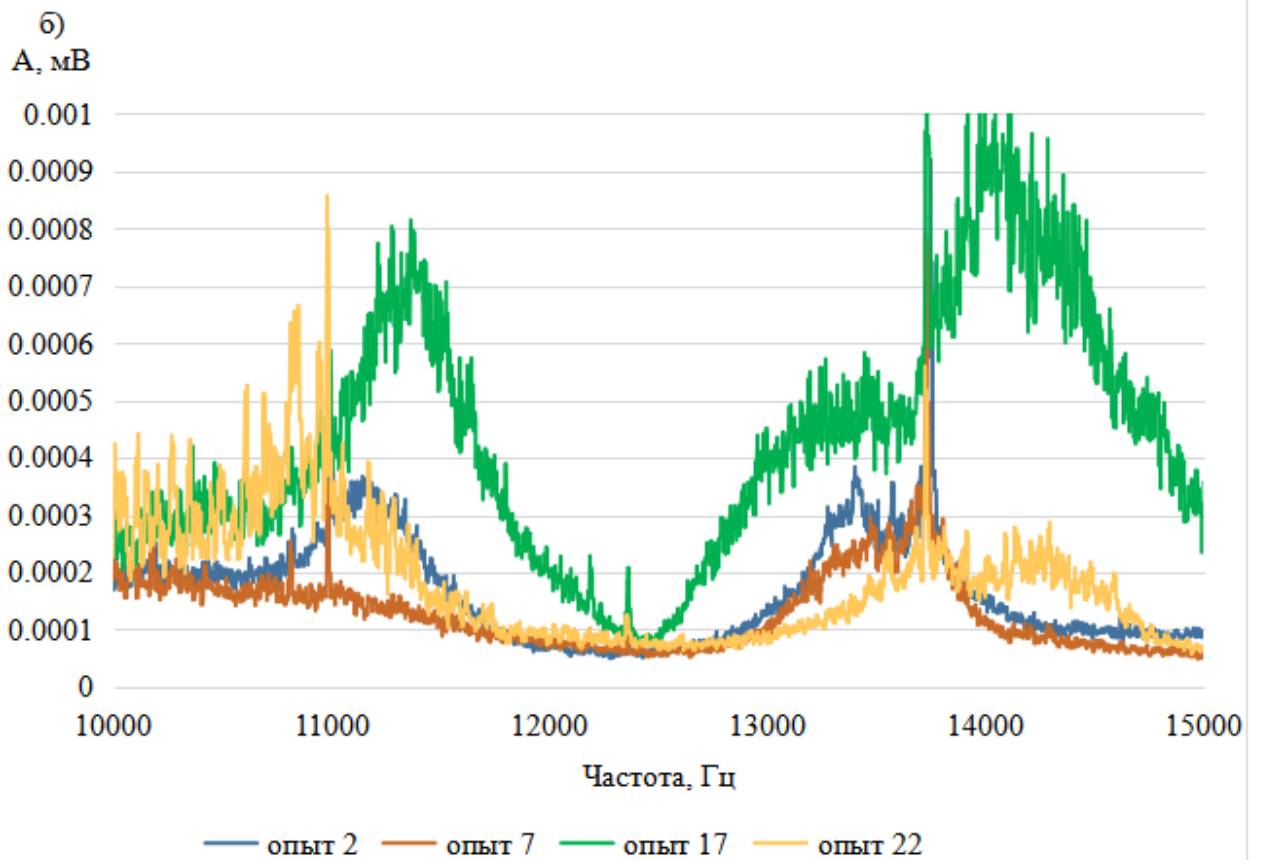
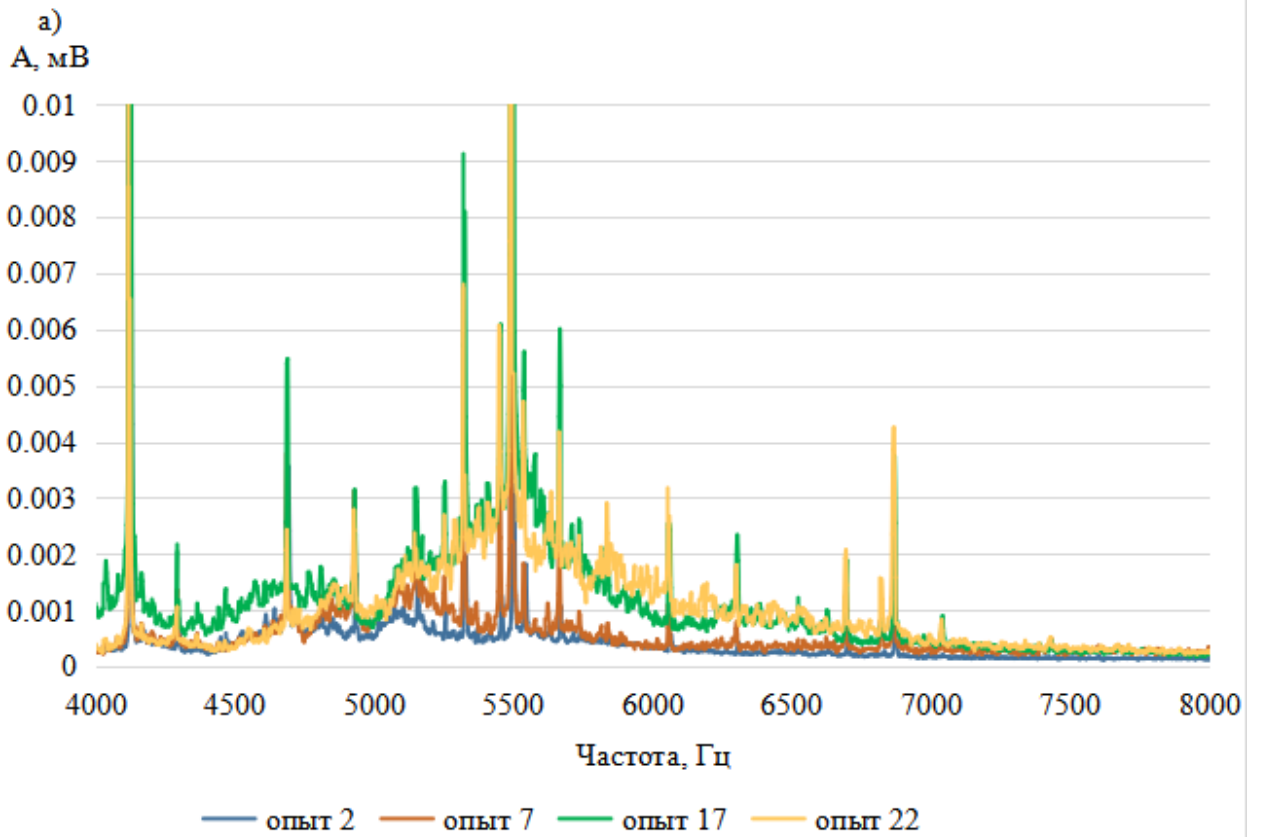


Рисунок Г.6 – Спектры рабочего процесса (а) от 4 до 8 кГц, (б) от 10 до 15 кГц

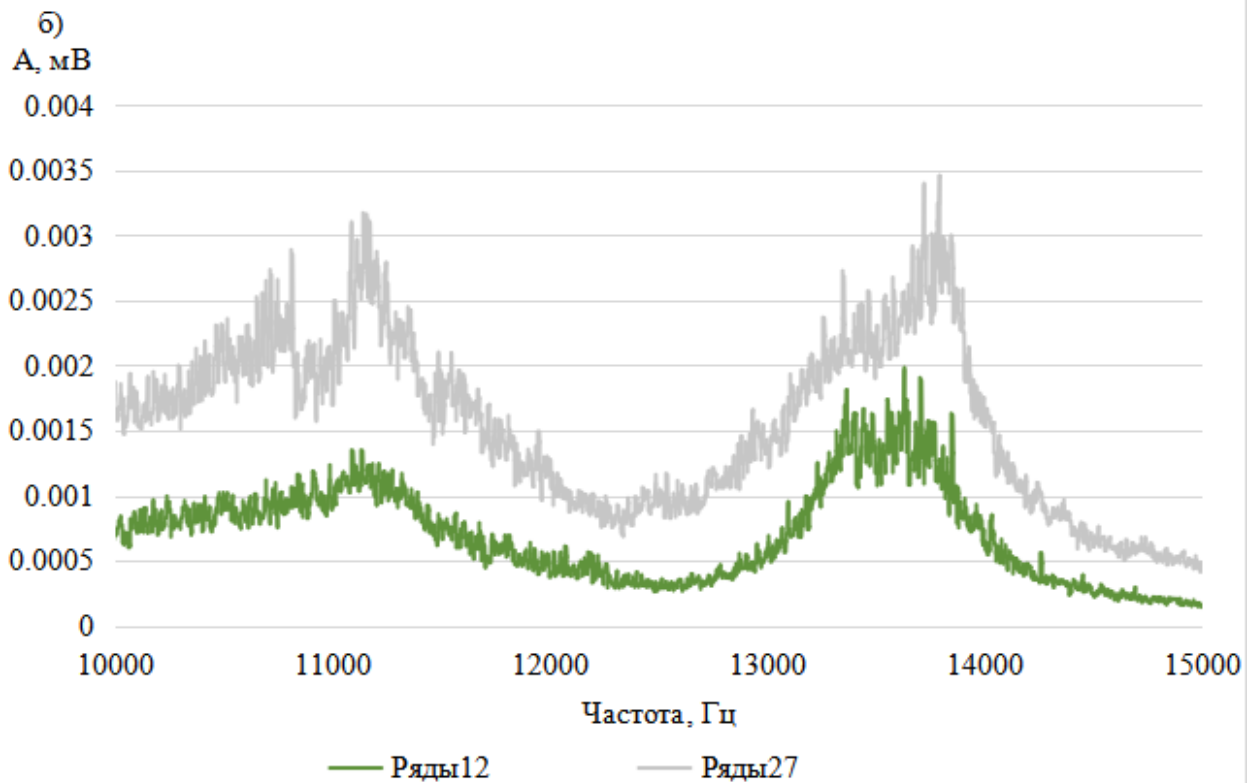
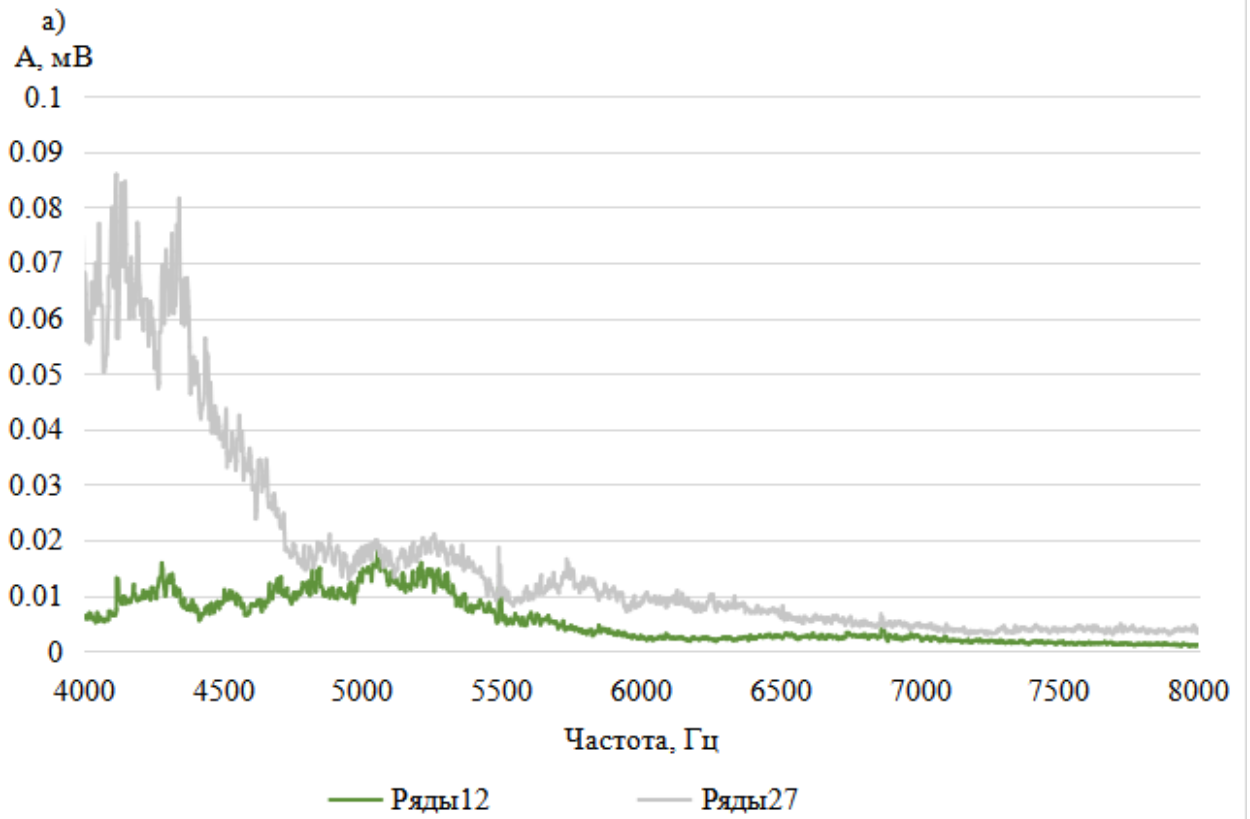


Рисунок Г.7 – Спектры рабочего процесса (а) от 4 до 8 кГц, (б) от 10 до 15 кГц

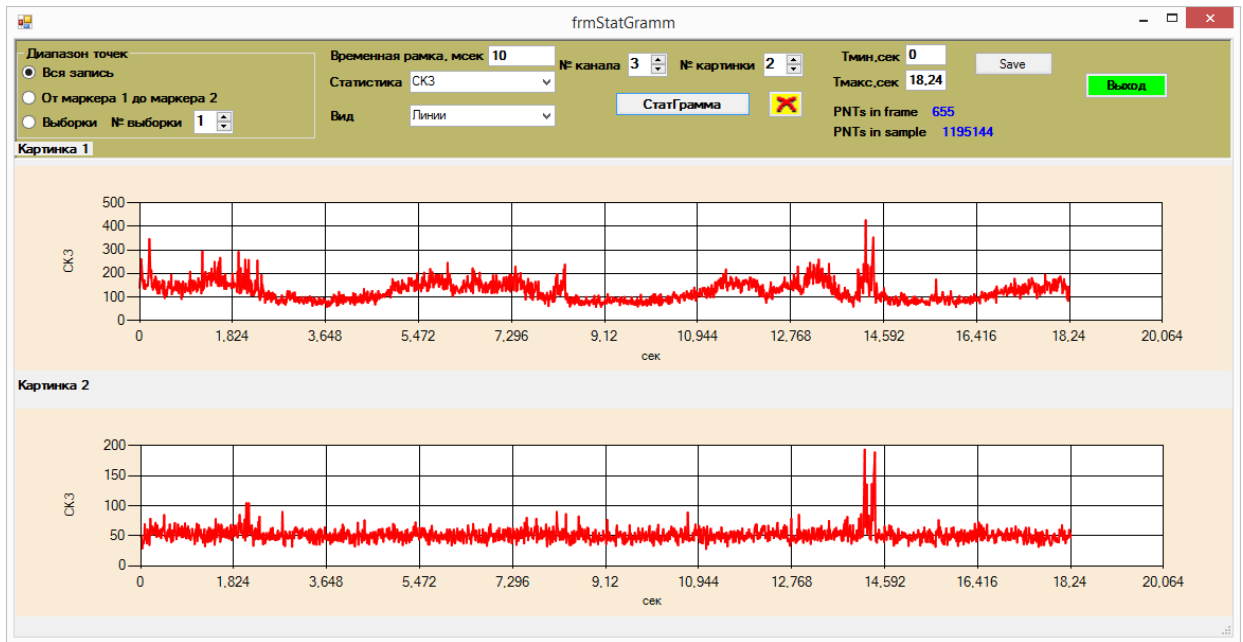


Рисунок Г.8 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №2: (верхний график) от 5 до 6 кГц, (нижний график) от 10 до 12 кГц

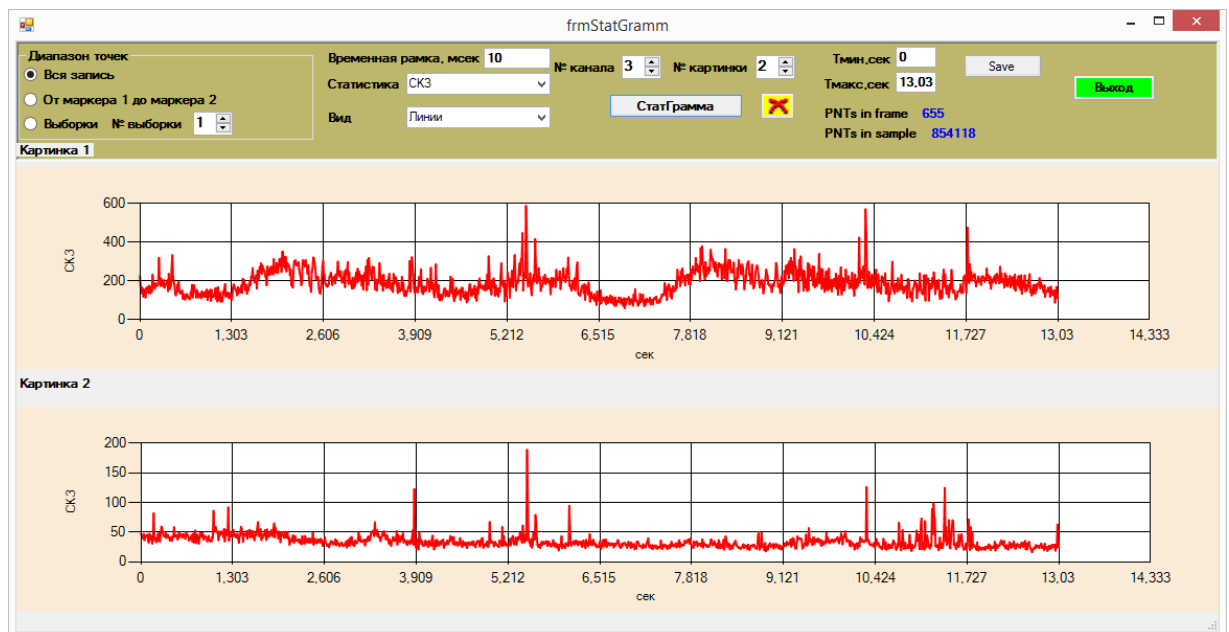


Рисунок Г.9 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №7: (верхний график) от 5 до 6 кГц, (нижний график) от 10 до 12 кГц

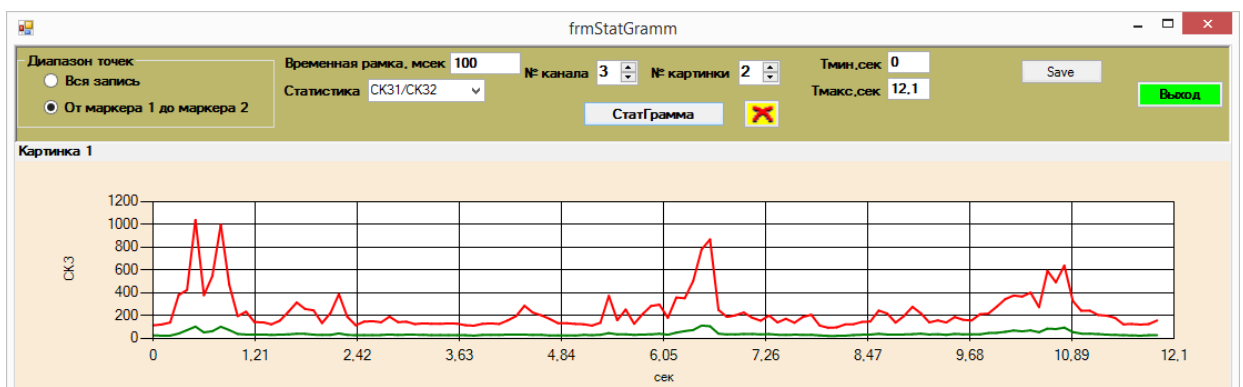


Рисунок Г.10 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №12(красный график) от 5 до 6 кГц,
(зеленый график) от 10 до 12 кГц

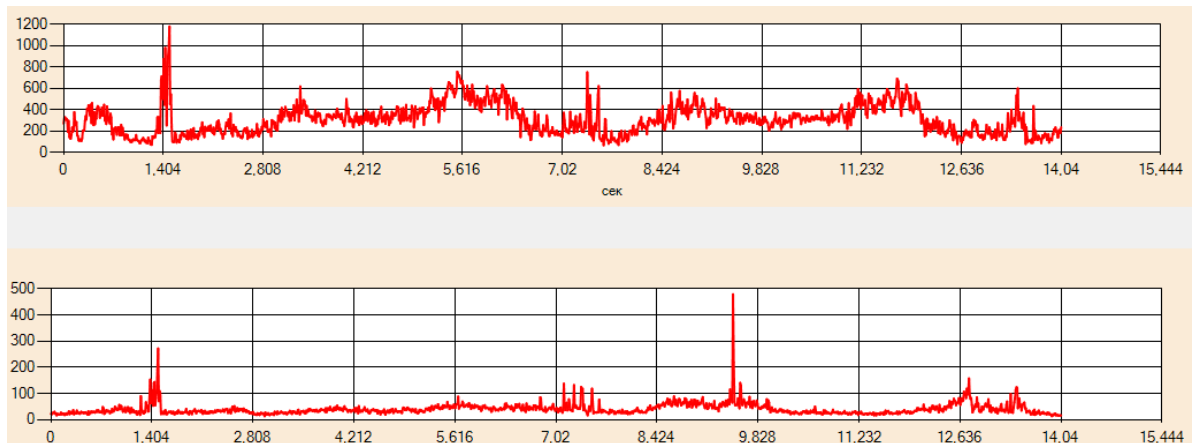


Рисунок Г.11 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №17: (верхний график) от 5 до 6 кГц,
(нижний график) от 10 до 12 кГц

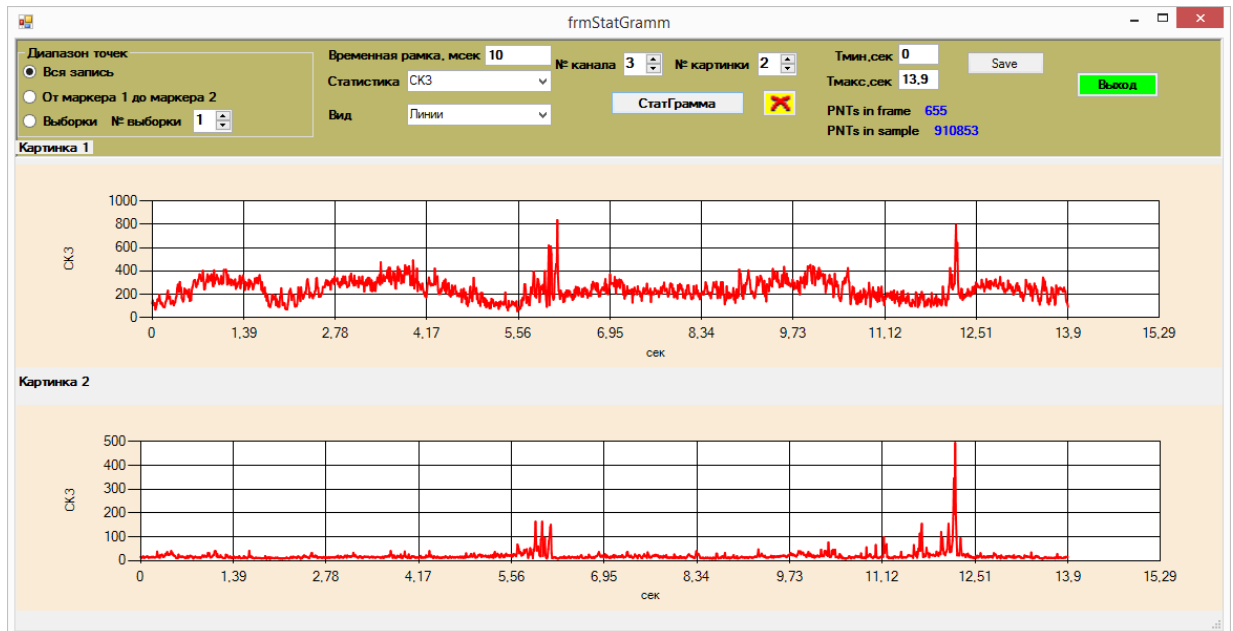


Рисунок Г.12 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №22(верхний график) от 5 до 6 кГц,
(нижний график) от 10 до 12 кГц

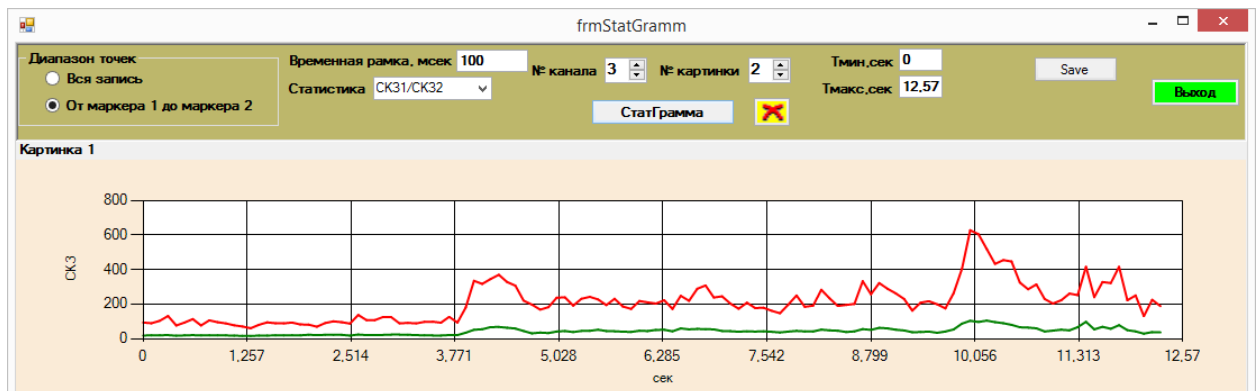


Рисунок Г.13 – СКЗ сигнала рабочего процесса опыта №27(красный график) от 5 до 6 кГц,
(зеленый график) от 10 до 12 кГц

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты использования результатов научной работы и апробация имитационной модели



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«СЕВЕРНОЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЕ
ПРЕДПРИЯТИЕ»

АО «ПО «Севмаш», Архангельское шоссе, д. 58, г. Северодвинск, Архангельская обл., 164500; телефон: +7 (818-4) 50-47-17, факс: +7 (818-4) 58-02-19; теленс: 276183 GROMRU, эл. почта: smr@svevmash.ru, для телеграммы «Гранит», ОГРН 07542856, ОГРН 1082902001401, ИНН/НПД 2902059091/997450001

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор, д.т.н.

должность, ученая степень

АО «ПО «Севмаш»

/ Будничев М.А. /

подпись

фамилия, инициалы

«16» января

2026 г.

АКТ № 89.134D / 3 - 16.01.2026

использования результатов научной работы Клачкова Владимира Андреевича

Комиссия в составе: председателя – начальника сектора 62.60 ПКБ «Севмаш», доктора технических наук Некрасова В.А. и членов: ведущего конструктора группы 62.61 ПКБ «Севмаш», кандидата технических наук Лужанского Д.А., инженера-технолога 2 категории отдела информационных систем ТПП и ТД НТУ, кандидата экономических наук Павловой А.Н., составила настоящий акт о том, что результаты научной работы Клачкова В.А. – диагностический параметр K_f , представляющий отношение амплитуд сигналов акустической эмиссии в диапазонах низких и высоких частот, и имитационная модель процесса взаимной сферической притирки, представленные в работах:

– Клачков В.А., Худяков М.П. Исследование технологического процесса притирки шаровых шарниров: подходы к созданию имитационной модели рабочего процесса / В.А. Клачков, М.П. Худяков // Вестник МГТУ "Станкин". – 2025. – № 2(73). – С. 66-79.

– Козочкин М.П., Клачков В.А. Исследование связей параметров акустической эмиссии со стадиями процесса взаимной сферической притирки деталей шарнира / М.П. Козочкин, В.А. Клачков // Контроль. Диагностика. — 2025. — Т. 28, № 12. — С. 51-62.



Сертифицировано
Русским Регистром

Ф. 89.31.02в

были использованы при изготовлении опытной партии судовых шаровых шарниров КФ6.367.002, -003, являющихся компонентом системы противоударной платформы КФ4.123.019.

Использование данных результатов при изготовлении опытной партии судовых шарниров позволило установить следующие положительные эффекты:

- повысить производительность притирочной операции при изготовлении судовых шаровых шарниров (на 8-15%), посредством подбора рациональных режимов обработки;
- сократить уровень производственного брака при изготовлении судовых шаровых шарниров (на 7-9%), посредством определения момента своевременного прекращения обработки.

Вывод: результаты научных исследований Клачкова В.А. приняты к внедрению на предприятии АО «ПО «Севмаш», так как имеют существенные положительные эффекты в реализации производственных технологических процессов изготовления судовых шаровых шарниров КФ6.367.002, -003.

Председатель комиссии:  Некрасов В.А. /
подпись фамилия, инициалы

Члены комиссии:

ПКБ «Севмаш»  / Лужанский Д.А. /

ОИС ТППиТД НТУ  / Павлова А.Н. /



УТВЕРЖДАЮ

И. о. директора филиала
САФУ им. М.В. Ломоносова
Н. В. Никудина

№ 7-н

28 января 2026 г.

АКТ

о внедрении в учебный процесс филиала Северного (Арктического) федерального университета имени М. В. Ломоносова в г. Северодвинске института судостроения и морской арктической техники (Севмашвтуз) результатов диссертации Клачкова Владимира Андреевича на тему: «Повышение эффективности процесса взаимной сферической притирки посредством имитационного моделирования и мониторинга параметров акустической эмиссии».

Мы, нижеподписавшиеся, представители кафедры технологии металлов и машиностроения: заведующий кафедрой, к.т.н., доцент Фомин Евгений Владимирович, доцент кафедры, к.т.н., доцент Худяков Михаил Павлович составили настоящий акт о том, что результаты диссертации В. А. Клачкова внедрены в разделы курсов дисциплин «Процессы и оборудование машиностроительных производств», «Автоматизация производственных процессов машиностроения» по направлению подготовки 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, а также «Расчет, моделирование и конструирование оборудования с компьютерным управлением» по направлению подготовки 15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств, а именно:

1. Влияние технологических режимов на качество обработанных поверхностей;
2. Исследование силовых характеристик процесса обработки металлов резанием;
4. Исследование колебаний в технологической системе резания.

Указанные результаты были внедрены в учебный процесс для студентов (бакалавров и магистрантов) очной и заочной формы обучения.

Директор института судостроения
и морской арктической техники
(Севмашвтуз)

_____ М. Л. Ивлев

Заведующий кафедрой
технологии металлов
и машиностроения

_____ Е. В. Фомин

Доцент кафедры
технологии металлов
и машиностроения

_____ М. П. Худяков



ОСК | Севмаш ✓

ИНЖЕНЕР СЕВМАША - ЛАУРЕАТ ПРЕМИИ «МОЛОДОЙ КОРАБЛЕСТРОИТЕЛЬ»

Инженер проектно-конструкторского бюро предприятия ОСК Севмаш, представитель Архангельского РО Союзмаш Владимир Клачков стал лауреатом XI Всероссийского конкурса «Молодой кораблестроитель – инженер года-2025». Торжественная церемония награждения прошла в Санкт-Петербурге в Российском научно-техническом обществе судостроителей имени академика А.А. Крылова.

Владимир стал одним из 19 лауреатов финального этапа ежегодного отраслевого конкурса. Он прошел отбор среди специалистов, студентов и аспирантов до 32 лет из научных институтов и предприятий отрасли из Москвы, Санкт-Петербурга, Северодвинска, Владивостока, авторов прорывных проектов для кораблестроительной отрасли. В работе конференции приняли участие представители ведущих научных-исследовательских организаций, проектно-конструкторских бюро и предприятий судостроительной промышленности России.

Профессиональное признание Владимиру принесла работа, посвященная имитационному моделированию технологической операции взаимной сферической притирки. Представленная им передовая методика позволяет повысить качество и сократить сроки технологических процессов при строительстве заказов на предприятиях судостроительного профиля.

Лауреаты конкурса отмечены дипломами с присуждением звания «Молодой кораблестроитель – Инженер года 2025», памятными медалями и денежными премиями.

Поздравляем Владимира с наградой!

Ссылка на публикацию: https://vk.com/wall-1017445_68419

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Патенты на изобретения и свидетельства о государственной регистрации программ для
ЭВМ РФ по теме диссертации

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 772 527**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 37/025 (2022.02); *B24B 29/04* (2022.02); *B24B 51/00* (2022.02); *B24B 11/00* (2022.02)

(21)(22) Заявка: 2021123262, 04.08.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.08.2021Дата регистрации:
23.05.2022Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 04.08.2021

(45) Опубликовано: 23.05.2022 Бюл. № 15

Адрес для переписки:
163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины,
17, ФГАОУ ВО СФУ, Давидович Марина
Васильевна(72) Автор(ы):
Клачков Владимир Андреевич (RU),
Худяков Михаил Павлович (RU)(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Северный (Арктический)
федеральный университет имени М. В.
Ломоносова» (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 1324828 A1, 23.07.1987. SU
1759610 A1, 07.09.1992. SU 1502280 A1,
23.08.1989. SU 1166975 A1, 15.07.1985. US 4023311
A1, 17.05.1977.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 797 801**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)

(52) СПК
B24B 37/025 (2023.02)
B24B 29/04 (2023.02)
B24B 51/00 (2023.02)
B24B 11/00 (2023.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 08.06.2023)

(21)(22) Заявка: 2022129719, 16.11.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.11.2022Дата регистрации:
08.06.2023Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 16.11.2022

(45) Опубликовано: 08.06.2023 Бюл. № 16

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1092033 A1, 15.05.1984. SU
844237 A1, 07.07.1981. SU 441136 A1,
30.08.1974. US 4023311 A1, 17.05.1977.Адрес для переписки:
127994, Москва, ГСП-4, Валковский пер., 1,
ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", УИС(72) Автор(ы):
Григорьев Сергей Николаевич (RU),
Козочкин Михаил Павлович (RU),
Клачков Владимир Андреевич (RU)(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский
государственный технологический
университет "СЪАНКИН" (ФГБОУ ВО
"МГТУ "СТАНКИН") (RU)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 797 803** (13) **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)
(52) СПК
B24B 37/025 (2023.02)
B24B 29/04 (2023.02)
B24B 51/00 (2023.02)
B24B 11/00 (2023.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 08.06.2023)

<p>(21)(22) Заявка: <u>2022129720</u>, 16.11.2022</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 16.11.2022</p> <p>Дата регистрации: 08.06.2023</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 16.11.2022</p> <p>(45) Опубликовано: 08.06.2023 Бюл. № 16</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1092033 A1, 15.05.1984. SU 844237 A1, 07.07.1981. SU 441136 A1, 30.08.1974. US 4023311 A1, 17.05.1977.</p> <p>Адрес для переписки: 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., 1, ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", УИС</p>	<p>(72) Автор(ы): Григорьев Сергей Николаевич (RU), Козочкин Михаил Павлович (RU), Клачков Владимир Андреевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)</p>
--	---

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11) **2 797 804** (13) **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)
(52) СПК
B24B 37/025 (2023.02)
B24B 29/04 (2023.02)
B24B 51/00 (2023.02)
B24B 11/00 (2023.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 08.06.2023)

<p>(21)(22) Заявка: <u>2022129721</u>, 16.11.2022</p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 16.11.2022</p> <p>Дата регистрации: 08.06.2023</p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: 16.11.2022</p> <p>(45) Опубликовано: 08.06.2023 Бюл. № 16</p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: SU 1092033 A1, 15.05.1984. SU 844237 A1, 07.07.1981. SU 441136 A1, 30.08.1974. US 4023311 A1, 17.05.1977.</p> <p>Адрес для переписки: 127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., 1, ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", УИС</p>	<p>(72) Автор(ы): Клачков Владимир Андреевич (RU)</p> <p>(73) Патентообладатель(и): Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)</p>
--	--

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 797 805** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)
(52) СПК
B24B 37/025 (2023.02)
B24B 29/04 (2023.02)
B24B 51/00 (2023.02)
B24B 11/00 (2023.02)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 08.06.2023)

(21)(22) Заявка: **2022129722**, **16.11.2022**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.11.2022Дата регистрации:
08.06.2023Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **16.11.2022**(45) Опубликовано: **08.06.2023** Бюл. № 16(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **SU 1092033 A1, 15.05.1984. SU 844237 A1, 07.07.1981. SU 441136 A1, 30.08.1974. US 4023311 A1, 17.05.1977.**Адрес для переписки:
127994, Москва, ГСП-4, Вадковский пер., 1, ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", УИС(72) Автор(ы):
Клячков Владимир Андреевич (RU)(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН" (ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН") (RU)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 811 620** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
B24B 37/025 (2012.01)
B24B 29/04 (2006.01)
B24B 51/00 (2006.01)
B24B 11/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B24B 37/025 (2023.08); B24B 29/04 (2023.08); B24B 51/00 (2023.08); B24B 11/00 (2023.08)

(21)(22) Заявка: **2023124716**, **26.09.2023**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.09.2023Дата регистрации:
15.01.2024Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: **26.09.2023**(45) Опубликовано: **15.01.2024** Бюл. № 2Адрес для переписки:
163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17, ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет, Давидович Марина Васильевна(72) Автор(ы):
**Клячков Владимир Андреевич (RU),
Худяков Михаил Павлович (RU),
Русановский Сергей Александрович (RU)**(73) Патентообладатель(и):
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова" (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **RU 2797801 C1, 08.06.2023. SU 441136 A, 13.05.1975. SU 844237 A1, 07.07.1981. RU 2772527 C1, 23.05.2022. US 4023311 A1, 17.05.1977.**

