

На правах рукописи



Ильиных Виктор Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО
ИНСТРУМЕНТА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКОВ НА ОСНОВЕ
ПРОФИЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С РАВНООСНЫМ КОНТУРОМ**

Специальность 2.5.2. Машиноведение

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Чита – 2023

Работа выполнена в Забайкальском институте железнодорожного транспорта – филиале федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» в г. Чите

Официальные оппоненты:

Вартанов
Михаил Владимирович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», г. Москва;

Рауба
Александр Александрович

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Технологии транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава», г. Омск;

Щенятский
Алексей Валерьевич

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова», и.о. директора института «Современные технологии машиностроения, автомобилестроения и металлургии», заведующий кафедрой «Мехатронные системы», профессор кафедры «Мехатронные системы», г. Ижевск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва.

Защита состоится «22» сентября 2023 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.350.06, созданного на базе ОмГТУ по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» по адресу: г. Омск, пр. Мира, 11 и на официальном сайте: <https://omgtu.ru>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять в диссертационный совет 24.2.350.06 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета. Тел: (3812) 65-24-79. E-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.350.06,
кандидат технических наук



Д.В. Ситников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В условиях единичного и мелкосерийного производства изделий широко применяются многоцелевые станки с ЧПУ. Спецификой работы многоцелевого станка (МС) является то, что в процессе изготовления призматических деталей различных форм (корпусная, плоская, фигурная) для данного вида производства, при выполнении операций растачивание, фрезерование, сверление и др. необходима многоразовая замена технологических комплектов инструментов, которые выполнены на основе унифицированных модулей разного функционального назначения и различных типов размеров. В результате замены происходит организованная смена баз в коническом соединении шпиндель - оправка, что существенно влияет на показатели качества шпиндельного узла (ШУ), в частности на его точность и жесткость. По условию эксплуатации моментопередающее коническое соединение ШУ МС многократно собирается и разбирается в процессе изготовления изделия. При этом каждый раз при базировании и закреплении базовой оправки вспомогательного инструмента необходимо гарантировать точность технологической системы обеспечивая полную взаимозаменяемость сборной конструкции. Из работ Балакшина Б.С., Глейзера Л.А., Колесова И.М., Соломенцева Ю.М., Новикова М.П. следует, что точность станка, является основным показателем его качества и определяется совокупностью действия факторов геометрических, конструктивных, жесткостных, а также внешних нагрузок, которые изменяются во времени.

Основными факторами, которые влияют на точность при многоразовом базировании и закреплении вспомогательного инструмента относительно шпинделя станка, являются: точность изготовления, собственная и контактная жесткость, сила закрепления, способ фиксации, скорость сборки, физико-механические характеристики материала, геометрическая форма базовых оправок и концов шпинделей. К факторам, которые влияют на перемещения вспомогательного инструмента при эксплуатации можно отнести: скорость вращения шпинделя, износ базовых оправок, действие переменной внешней нагрузки. В работах Решетова Д.Н., Левиной З.М., Каминской В.В., Рыжова Э.В., Суслова А.Г., Шевелевой Г.И., Укроженко К.А. указано, что точность и жесткость машин существенно зависит от жесткости стыков деталей соединений. Упругие перемещения в стыках соединений при контактной деформации могут составлять до 60 % в балансе упругих перемещений машины при действии внешних нагрузок. При этом доля погрешности обработки изделия, которая определяется жесткостью стыков соединений станка, может достигать 80 %. Комплексный учет выше названных факторов при моделировании точности и жесткости конических соединений шпиндельных узлов МС, позволит на этапе проектирования прогнозировать показатели их качества при совершенствовании известных или разработке новых конструкций.

Применение устройств автоматической смены инструмента (АСИ) накладывает определенный подход в решение задачи обеспечения показателей точности и жесткости конических соединений ШУ МС. Отличительной осо-

бенностью решения задачи от ранее известных решений является учет много-разового базирования и закрепления деталей конического соединения шпindel-оправка, изменение рельефа сопрягаемых поверхностей контакта деталей при сборке - разборке соединения, а также обеспечение неподвижности деталей соединения в процессе эксплуатации. Поставленная задача может быть успешно решена при замене базовых оправок типа SK, BT (DBT), HSK конических разъемных соединений широко применяемых в ШУ МС с ЧПУ, производимых в России, Австрии, Японии, Германии, Швеции, США на инновационные конструкции моментопередающих конических соединений. В частности на разъемные конические профильные соединения с равноосным контуром типа P3 конусностью 1:10 и 7:24. Как следует из анализа отечественной и зарубежной литературы, научных работ Ю.М. Соломенцева, Д.В. Чарнко, А.И. Тимченко, F. Danzera, R. Musul, A. Frank, R. Mayr, C. Gottlicher профильные соединения с равноосным контуром с числом граней равным трем с цилиндрической образующей контура внедрены в отдельные ответственные механизмы и узлы станков. В настоящее время широкое применение получила на токарных станках с ЧПУ быстросменная оснастка Coromant Capto (PSK) с размерами профильных соединений от C3 до C10 с ручной или автоматической сменой инструмента. Погрешность изготовления деталей самотормозящих соединений типа PSK конусностью 1:22,9 применяемых в револьверных головках и узлах шпindel-оправка по схеме конус-торец приводит к образованию «плотных» или «свободных» конических посадок, что ведет к неопределенности базирования и снижению точности конического профильного соединения. Недостаточная изученность технических решений жестких инструментальных систем, а также отсутствие теоретической базы позволяет сделать вывод, что проектирование и применение быстросъемных неподвижных конических профильных соединений с равноосным контуром типа P3 рациональной конусности остается мало исследованной областью знаний. Стратегически важной и перспективной задачей является их интеграция в качестве моментопередающих конических соединений в шпindelный узел при разработке новых и совершенствовании известных конструкций МС отечественного производства.

Научный интерес представляет развитие концепции совершенствования конструкций моментопередающих соединений ШУ МС и повышение их качества на основе применения инновационных конических профильных соединений подсистем вспомогательного инструмента.

Цель работы - повышение точности и жесткости конических разъемных соединений ШУ МС за счет разработки новых технических решений и установления функциональных связей между конструктивно-технологическими параметрами профильных соединений вспомогательного инструмента и показателями, характеризующими качество его сопряжения со шпинделем в условиях многофазовой смены и последующей эксплуатации.

Для достижения поставленной цели работы необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ конструкций технологических комплектов инструментов многоцелевых станков, на основе разъемных конических круглых и

профильных соединений шпиндельных узлов, иллюстрирующих проблему обеспечения качества последних.

2. Разработать математические модели оправок и имитационную модель конических круглых и профильных соединений шпиндельных узлов, которые предназначены для решения задач кинематики и динамики:

– определение кинематических и кинетостатических параметров движения базовых оправок с учетом сил трения и отклонений геометрической формы (макро и микрогеометрии) при многоразовом базировании и закреплении оправок в шпинделе станка в объемной постановке на основе последовательного решения дифференциальных уравнений движения твердых тел численным методом Адамса.

3. Определить параметры контактного взаимодействия деталей в профильном соединении типа втулка – вал при решении контактной задачи теории упругости в нелинейной постановке в статике численными методами конечных разностей и функции отклика.

4. Провести машинный имитационный эксперимент по определению показателей качества конических профильных соединений типа шпиндель-оправка с учетом износа. Для этого разработать математическую модель, учитывающую износ посадочных поверхностей хвостовиков базовых оправок, возникающий в условиях многоразовых смен вспомогательного инструмента.

5. Провести экспериментальные исследования напряженного состояния моделей моментопередающих профильных разъемных соединений типа РЗ, изготовленных из оптически чувствительных материалов способом статической фотоупругости, работающих в условиях переменных нагрузок.

6. Провести натурные испытания моментопередающих профильных разъемных соединений типа РЗ, работающих в условиях фреттинг-износа.

Поставленные задачи исследования являются укрупненными и в процессе исследования детализируются в узконаправленные подзадачи.

Методы исследования. Основные результаты в диссертации получены на основе глубокого литературного и патентного поиска, анализа и систематизации данных; использования при решении задачи сопряжения деталей не идеальной формы, методов численного решения Рунге-Кутты и Адамса. Контактная задача теории упругости для случая ненасыщенного контакта решена с применением метода конечных разностей и функции отклика. Программно-математические комплексы реализованы на основе универсального языка высокого уровня Паскаль-7 на ПЭВМ. При проведении экспериментальных исследований на моделях деталей профильного соединения изготовленных из оптически чувствительных материалов использовался поляризационно-оптический метод статической фотоупругости.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Установлены закономерности влияния:

- параметров отклонений геометрической формы хвостовиков базовых оправок при многоразовом базировании и закреплении в шпинделе, а также скорости вращения шпинделя на точность и жесткость конических соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ;

- конструктивных параметров и условий внешнего нагружения на распределение контактных давлений в стыках профильных соединений для много связанных областей контакта, границы которых заранее не известны;
- количества сборок-разборок профильных соединений на характер изменения показателей точности и прочности контакта стыков соединений;
- комплексной нагрузки на характер изменения максимальных касательных напряжений в стыках профильных соединений;
- конструктивных параметров профильных соединений на характер и величину износа стыков соединения в условиях колебаний малых амплитуд.

2. Разработана методика выбора рациональных конструктивных параметров конических профильных разъемных соединений модульного инструмента, обеспечивающих высокую точность и жесткость соединений в условиях многократного базирования и закрепления в сравнении с известными техническими решениями.

На защиту выносятся следующие научные положения диссертационной работы:

1. Математические модели физических задач, реализованные на основе применения теории случайных процессов и дифференциальных уравнений движения твердых тел, позволяющие рассчитывать конические соединения ШУ и прогнозировать показатели их качества в процессе конструирования и эксплуатации многоцелевых станков в условиях многократной смены вспомогательного инструмента. В их число входят:

- математическая модель оправок вспомогательного инструмента с коническим хвостовиком на основе данных полученных для разных технологий изготовления оправок.

- математическая модель оправок вспомогательного инструмента с коническим хвостовиком на основе полученных данных измерений прототипов оправок для разных условий эксплуатации вспомогательного инструмента различных технологических групп.

- имитационная модель конического соединения с определением кинематических и кинетостатических параметров процесса базирования и закрепления базовой оправки с учетом отклонений геометрической формы со шпинделем путем последовательного решения дифференциальных уравнений второго порядка движения твердых тел, в квазидинамической постановке численным методом Адамса.

2. Комплекс исследований по определению фактического положения вспомогательного инструмента при многократном базировании и закреплении в шпинделе станка с учётом случайного геометрического профиля поверхностей хвостовиков базовых оправок и оценка точности и жёсткости конических соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков различных компоновок в условиях действия внешних нагрузок.

3. Результаты решения контактной задачи теории упругости в статике для много связанных областей контакта профильных соединений с равноосным контуром с числом граней равным трем, путем применения численных методов расчета конечных разностей и функции отклика, включающие установление

функциональных связей между параметрами контакта в зависимости от конструктивных параметров соединения и внешних нагрузок.

4. Результаты компьютерного моделирования процесса сборки конического профильного соединения с учетом износа хвостовика базовой оправки, возникающего при многократной смене вспомогательного инструмента, включающие установление функциональных связей между параметрами точности и прочности и количеством сборок-разборок соединения.

5. Результаты экспериментальных исследований напряженного состояния моделей профильных соединений с равноосным контуром, изготовленных из оптически чувствительных материалов, работающих в условиях комплексной нагрузки, а также результаты натурных испытаний профильных соединений с равноосным контуром на износ в условиях фреттинг.

Степень разработанности темы. Изучению проблемы повышения качества изготовления машин, в частности станков посвящено достаточное количество фундаментальных работ отечественных и зарубежных ученых. К ним можно отнести научные работы: Б.С. Балакшина, Л.А. Глейзера, Д.Н. Решетова, Ю.М. Соломенцева, И.М. Колесова, В.С. Корсакова, А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, В.А. Кудинова, М.П. Новикова, Б.М. Базрова, Д.В. Чарнко, В.А. Тимирязева, А.Г. Схиртладзе, А.А. Гусева, В.Г. Митрофанова, М.Г. Косова, Н.М. Султан - Заде, С.Н. Григорьева, В.В. Бушуева, М.В. Вартанова, Ю.В. Подураева, Елисеева С.В., Ю.П. Сердобинцева, К.А. Украженко, В.В. Молодцова, А.П. Кузнецова, А.А. Кутина и других ученых. В данных работах разработаны научные основы достижения точности и жесткости замыкающих звеньев технологических систем, установлены вероятностные связи технологических процессов сборки и обработки изделий, вскрыты существо физических процессов, протекающих во времени.

При проектировании и оценке точности машин и соединений различного служебного назначения принимались определенные допущения. Можно выделить основные допущения в решении задачи моделирования точности и жесткости соединений различного функционального назначения. Статическая постановка задачи по определению погрешности базирования при учете отклонений формы деталей и отклонений взаимного расположения поверхностей деталей соединений, упругий контакт деталей соединений. Решение задачи определения фактического положения деталей соединения, при учете макро и микрогеометрии формы деталей в условиях плоскопараллельного движения при базировании и закреплении. Не учитывались условия эксплуатации разъемных соединений, а именно многократные сборки и разборки.

Из работ зарубежных ученых следует отметить исследования, процессов сборки различных соединений деталей машин проведенных Kuroda Mitsuru, Maron A., Fischer S., Stoferle T., Leska S., Frankenhauser B., Havlik C., Weck M., Aoyama T., Hanna IM., Schubert Ingo, Park H., Song J., Stolt A., Dung N.V. и др.

Разработка и совершенствование конструкций многоцелевых станков отвечающих современным требованиям мировой практики, на основе применения инновационных моделей соединений ШУ, требует новых подходов при решении задачи обеспечения их качества с учетом реальных условий эксплуатации.

Рабочая гипотеза: состоит в том, что коническое профильное разъемное неподвижное соединение с равноосным контуром обеспечит в сборочной единице шпиндель – оправка: неподвижность соединения (отсутствие неорганизованной смены баз); точность соединения (при базировании и закреплении) при фиксации; жесткость соединения при передаче внешней нагрузки и быстрый разъем соединения при многоразовых сменах вспомогательного инструмента.

Объект исследования – шпиндели и оправки вспомогательного инструмента в существующих и вновь разрабатываемых конструкциях шпиндельных узлов многоцелевых станков выполненных на базе конических профильных разъемных неподвижных соединений с равноосным контуром с числом граней равным трем разной конусности.

Предмет исследования – процессы сопряжения базовых оправок и шпинделя станка при многоразовом базировании и закреплении вспомогательного инструмента, процессы контактного взаимодействия в профильном соединении при передаче внешней нагрузки; напряженно-деформированное состояние деталей конических соединений; упругие перемещения деталей конических соединений; процессы изнашивания деталей в профильном соединении в условиях фреттинг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа представляет собой научное обоснование новых технических решений, совершенствующих средства реализации процессов формообразования изделий на этапе проектирования, за счет изучения связей механических процессов, протекающих при сборке – разборке и эксплуатации конических профильных соединений ШУ МС и повышающих точность и жесткость средств реализации. По теме и содержанию материалов диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.2. Машиноведение. Полученные результаты обладают новизной, достоверностью и практической значимостью в части п. 2 и п. 5 раздела «Области исследований» ее паспорта. Пункт 2 паспорта «Теория и методы проектирования машин и механизмов, систем приводов, узлов и деталей машин». Пункт 5 паспорта «Методы исследования и оценки технического состояния объектов машиностроения, в том числе на основе компьютерного моделирования».

Теоретическую значимость работы представляет:

1. Имитационная модель конического профильного соединения с равноосным контуром, с учетом стохастического характера протекания сопряжения деталей соединения, имеющих отклонения от идеальной геометрической формы в условиях многоразового базирования и закрепления, позволяющая быстро и эффективно решить задачу проектирования новых устройств соединений.

2. Установление закономерности влияния параметров конструирования и условий внешнего нагружения на характер изменения максимальных касательных напряжений и износа стыков профильного соединения с равноосным контуром в условиях колебаний малых амплитуд.

3. Методика выбора рациональных конических посадок в профильном соединении с равноосным контуром, обеспечивающих высокую точность и жесткость в условиях многоразового базирования и закрепления базовых оправок в

шпинделе и разработке на основе предложенного подхода, конструкций оправок вспомогательного инструмента, обеспечивающих высокую точность и жесткость профильных соединений по сравнению с известными решениями.

Практическую значимость работы имеют:

1. Решение задачи повышения точности и жесткости конических соединений ШУ МС путем совершенствования их конструкций на основе разработки математических моделей оправок вспомогательного инструмента и концов шпинделей. Реализованные в виде программно-математических комплексов имитационная модель конического соединения позволяет проводить достоверную оценку показателей качества соединений ШУ многоцелевых станков при проектировании и дальнейшей эксплуатации, прогнозировать их работоспособность в течение времени по критерию точность и жесткость.

2. Новые технические решения на основе инновационных конических профильных соединений с равноосным контуром предназначенные для повышения точности и жесткости моментопередающих конических соединений ШУ в условиях многоразовых смен вспомогательного инструмента.

3. Рекомендации прогнозирования показателей качества моментопередающих конических соединений ШУ, которые учитывают реальные условия их эксплуатации, а именно: износ при многоразовой сборке и разборке, работу в условиях переменных напряжений при колебаниях малых амплитуд. На ранних стадиях проектирования позволяют проводить численное исследование конструктивных решений конических соединений ШУ влияющих на их работоспособность.

4. Рекомендации по проектированию и выбору предпочтительных сочетаний соединений базовых, переходных и конечных оправок модульного инструмента. Определено, что рациональным является соединение модулей типа P3(1:10)→PSK→PSK в сравнении с соединением модулей типа HSK→PSK→PSK.

Созданные конструкции базовых оправок вспомогательного инструмента МС, контрольно-измерительных средств точности концов шпинделей, программно-математический комплекс запатентованы и могут быть внедрены в производство. Получены патенты на полезные модели № 142049 от 06.11.2013, № 155119 от 05.03.2015, № 164678 от 31.03.2016, № 184076 от 14.03.2018, № 190690 от 13.03.2019, № 195759 от 30.08.2019, № 205596 от 14.12.2020.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач диссертационной работы, рабочей гипотезы, в проведении патентного поиска, в сборе и анализе данных о результатах исследований отечественных и зарубежных ученых. В работе обобщены результаты исследований, полученные лично автором и соавторстве. В разработке математических моделей оправок профильных и круглых конических соединений; методики компьютерного моделирования процесса сопряжения базовых оправок с отклонениями геометрической формы хвостовика и конца шпинделя, а также в разработке методики моделирования механического износа. В решении контактной задачи для много связанной области на основе численного расчета методом конечных разностей и функции отклика. В исследовании работы моделей профильных соединений изготовлен-

ных из оптически чувствительных материалов методом статической фотоупругости при комплексной нагрузке. В проведении натуральных экспериментальных исследований профильных соединений типа РЗ на фреттинг-износ. В проведении исследований и разработке рекомендаций по проектированию конических профильных соединений. Общие выводы диссертации сформулированы лично автором.

Степень достоверности результатов. Подтверждается применением расчетно-аналитической базы, которая соответствует современным требованиям развития науки и техники. Результатами экспериментов при имитационном моделировании на ПЭВМ при использовании разработанных и известных программных комплексов. Получением достоверных данных методами численного решения Адамса, конечных разностей, конечных элементов (МКЭ), функций отклика (МФО). Результатами экспериментальных исследований моментопередающих соединений на моделях и натуральных образцах, проведенных в лаборатории фотоупругости ВНИИММАШ (г. Москва 1982-1984 г.); в лаборатории технология машиностроения МГТУ (Станкин 1984-1988 г.); в производственных условиях ремонтно-инструментального завода (РИЗ) и Двигателей АО КамАЗ (г. Набережные Челны 1988-1991 г.); Читинском станкостроительном и машиностроительном заводах (г. Чита 1991-2006, 2021 г.), Ставропольском электротехническом заводе «Энергомера» (г. Ставрополь 2021 г.) на действующем современном технологическом оборудовании, выполненных самостоятельно автором.

Апробация работы. Основные результаты научных исследований докладывались и обсуждались на научных семинарах КАМПИ, ИрГУПС, ЗаБИЖТ, ИРННТУ, ОмГТУ. По результатам научных исследований были представлены доклады на следующих региональных, научно-технических, международных и Всероссийских научно-практических конференциях. Материалы научно-технической конференции КАМАЗ - КАМПИ «Научно-производственные и социально-экономические проблемы производства автомобиля КАМАЗ», (Набережные Челны, 1988); материалы Всесоюзной конференции «Конструктивно-технологическая информатика», (Москва, 1989); материалы научно-технической конференции «Наука-производству», (Набережные Челны, 1990); материалы региональной научно-технической конференции «Перспективные направления машиностроения Забайкалья» (Чита, 1991); материалы на республиканской научно-технической конференции «Совершенствование технологических процессов изготовления деталей машин» (Курган, 1991); труды Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы Транссиба на рубеже веков» (Хабаровск, 2000); труды Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития транссибирской магистрали в XXI веке» (Чита, 2006); материалы международной научно-практической конференции (Чита, 2008); материалы 3-й Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 2013); материалы седьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура сибирского региона» (Иркутск, 2016); Материалы международной научно-практической конференции «Транссиб: на острие реформ» (Чита, 2016); мате-

риалы восьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2017); материалы восьмой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2017); материалы Всероссийской научно-практической конференция (Чита, 2018); материалы десятой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2019), материалы международной конференции ЕЕСЕ 2019 (Санкт Петербург, 2019); материалы международной научно-технической конференции “International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering” МРСРЕ-2020 (Владимир, 2020), Российская Федерация; материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (Иркутск, 2021); результаты научно-технического семинара кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств (Иркутск, 2021); результаты меж кафедрального научно-технического семинара по проблемам механики им. В.Д. Белого (Омск, 2022).

Практическое применение результатов работы. Результаты диссертационного исследования внедрены на заводе «Двигателей» и «Ремонтно инструментальном заводе» АО КамАЗ, Читинском станкостроительном и машиностроительном заводе. Приняты к внедрению на Ставропольском электротехническом заводе «Энергомера». При разработке проектно-конструкторской документации, профильных соединений узлов автоматического оборудования фирмы Vamessberger и Pittler, а также при моделировании и прогнозировании точности и жесткости шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ моделей VZ-20, 2204ВМФ4, 2254ВМФ4, ИР320ПМФ4, ИР500ПМФ4, DMC V 635 ecoline.

Тема диссертационного исследования включена в единую государственную информационную систему учета научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ гражданского назначения (ЕГИСУ НИОКТР). Интернет номер / Регистрационный номер темы: 121091700017-9 от 17.09.2021 г.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 21 публикации в журналах из перечня ВАК РФ, в одной монографии, в четырех статьях в журналах, индексируемых в базах Scopus, в семи патентах на полезную модель, авторском свидетельстве на способ, двух свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ и четырех статьях в прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 271 наименований и приложений. Объем работы составляет 365 машинописных страниц основного текста и включает 34 таблицы, 143 рисунка, библиографический список 28 страниц, а также приложения 131 страниц. Общий объем работы 496 страниц.

Благодарности. Автор благодарит д.т.н., профессора Косова М.Г., д.т.н., профессора Митрофанова В.Г. МГТУ (Станкин) и д.т.н., профессора Елисеева С.В. (ИрГУПС) за оказанные научные консультации при проведении работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, дается краткая характеристика диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, отражены основные научные положения, выносимые на защиту, представлено краткое содержание глав диссертации.

В первой главе диссертации проведен литературный, патентный обзор и анализ научных работ отражающих суть проблемы обеспечения точности и жесткости конических соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ в условиях многоразовой смены вспомогательного инструмента.

Проблеме обеспечения качества металлорежущих станков на стадии их проектирования посвящено значительное количество фундаментальных работ отечественных ученых, а именно: Б.С. Балакшина, Д.Н. Решетова, А.С. Проникова, Ю.М. Соломенцева, Б.М. Базрова, И.М. Колесова, В.Э. Пуша, О.И. Аверьянова, А.А. Гусева, В.А. Гречишникова, В.Г. Митрофанова, В.А. Тимирязева, А.И. Тимченко, В.В. Бушуева, А.И. Промтова, Ю.И. Кузнецова, А.Р. Маслова, С.Н. Григорьева, А.Г. Схиртладзе А.Г., М.В. Вартанова, К.А. Украженко, В.Ю. Шишмарева, В.В. Молодцова, А.П. Кузнецова и многих других.

Авторами разработаны научные основы создания высококачественного технологического оборудования и оснастки, определены важнейшие направления научных исследований, позволяющие создавать высокоэффективное и конкурентоспособное технологическое оборудование и инструмент.

Одним из таких направлений является совершенствование геометрической формы деталей различных соединений, применяемых в частности в технологических комплексах инструментов многоцелевых станков, обладающих высокой точностью и жесткостью с одной стороны и взаимозаменяемостью в условиях автоматической смены вспомогательного инструмента с другой стороны.

Общий подход при решении поставленных задач определен в фундаментальных работах по теории базирования и размерных цепей, а также в работах по исследованию точности и жесткости деталей соединений шпиндельных узлов станков.

Направления исследований по моделированию точности металлорежущих станков, на примере агрегатных станков, при комплексном учете доминирующих факторов определяющих точность были определены профессором М.Г. Косовым. В работах автора представлено решение задачи обеспечения точности металлорежущего оборудования при автоматизированном проектировании и дальнейшей эксплуатации. На базе модифицированного метода конечных элементов автор определил класс задач с деформируемыми связями, а также новый класс имитационных контактных задач с учетом отклонений формы собираемых деталей, контактных и температурных деформаций.

Развитие вычислительной техники, создание новых программных комплексов определили новые подходы в решении задачи обеспечения точности металлорежущих станков, в частности многоцелевых, с учетом ранее получен-

ных весомых научных разработок и рекомендаций. Решение данной задачи возможно при разработке имитационных моделей соединений современных ШУ МС на основе новых конструкций конических профильных разъемных неподвижных соединений деталей машин, и возможности их применения в технологических комплектах инструмента, при проведении глубоких теоретических и экспериментальных исследований. Необходимо отметить работы в области расчетов на жесткость и прочность традиционных разъемных конических и цилиндрических моментопередающих соединений деталей машин, а также соединений деталей других форм отечественных ученых: Д.Н. Решетова, З.М. Левиной, И.В. Крагельского, В.М. Александрова, М.И. Теплового, Г.Б. Иосилевича, Н.М. Михина, А.Н. Журавлева, Л.С. Боровича, Г.Д. Коваленко, А.П. Моргунова и других. Данные решения представляют научную и практическую ценность при выборе класса расчетной модели в решении контактной задачи теории упругости при взаимодействии профильных поверхностей соединения с равноосным контуром известными методами численного расчета.

Развитие концепции повышения качества многоцелевых станков, обладающих высокой конкурентоспособностью на основе интеграции инновационных конических профильных соединений, охватывает прогнозирование и оценку точности и жесткости конических соединений при многократном базировании и закреплении вспомогательного инструмента в шпинделе станка путем моделирования процесса сборки соединения шпиндель – оправка во времени. Определение кинематических и кинетостатических параметров движения, в т. ч. с учетом степени износа хвостовиков базовых оправок вспомогательного инструмента; решение контактной задачи теории упругости для много связанных областей профильных соединений с равноосным контуром; исследование процессов изнашивания профильных соединений в условиях фреттинг может быть классифицировано как научное направление, имеющее важное народно-хозяйственное значение.

Во второй главе диссертации представлено теоретическое обоснование структуры математических моделей базовых оправок вспомогательного инструмента МС на основе применения теории случайных процессов. Математические модели построены на основе проведенного корреляционного и спектрального анализа данных измерений отклонений геометрической формы профильных деталей соединений, которые изготовлены технологическим способом разработанным профессором А.И. Тимченко. Рассмотрены технологии формирования профильных поверхностей, а именно: точение безвершинным резцом, шлифование прямым плоским кругом, шлифование чашечным кругом деталей соединения типа втулка - вал с равноосным контуром типа РЗ. Математическая модель поверхности хвостовика оправки представлена системой функций случайной величины радиус-вектора точек профиля, в рассматриваемых сечениях. На стадии проектирования оправок случайная величина радиус-вектора точек поверхности хвостовика j -ой реализации, определяется по формуле вида:

$$\bar{\rho}_{\phi,j}(\varphi, n) = \bar{\rho}_{н,j}(\varphi, n) + \bar{m}_{\Delta\rho,j}(\varphi, n) + \bar{\lambda}_{\Delta\rho,j}(\varphi, n); (j=1, \dots, 100), \quad (1)$$

где $\bar{\rho}_{n,j}(\varphi, n)$ – номинальный (теоретический) радиус-вектор точки кривой профиля оправки в рассматриваемом сечении;

$\bar{m}_{\Delta\rho,j}(\varphi, n)$ – математическое ожидание отклонения радиус-вектора точки кривой профиля оправки, в рассматриваемом сечении в результате действия систематических погрешностей при изготовлении;

$\bar{\lambda}_{\Delta\rho,j}(\varphi, n)$ – отклонение радиус-вектора точки кривой профиля оправки в рассматриваемом сечении в результате действия случайных погрешностей при изготовлении;

φ – текущая угловая координата точки кривой профиля оправки в поперечном сечении;

n – рассматриваемое поперечное сечение оправки;

j – номер текущей реализации кривой профиля оправки.

При изучении периодических процессов, в частности резания, целесообразно разлагать периодические функции, описывающие эти процессы в тригонометрические ряды. Разложение случайной функции описывающей изменение формы профиля оправок при изготовлении в ряды Фурье, позволило аналитически определить математическое ожидание, нормированные корреляционные функции отклонений радиус-векторов точек кривой профиля, а также определить распределение дисперсий отклонений радиус-векторов по гармоникам (рисунок 1). Формула (1) при текущем воспроизведении формы (опыте) может быть представлена в виде:

$$\bar{\rho}_{\phi}(\varphi) = \bar{\rho}_n(\varphi) + \left\{ a_0 + \sum_{k=1}^m [a_k \cdot \cos(k\varphi) + b_k \cdot \sin(k\varphi)] + \sqrt{D(\Delta\rho)} \cdot GENR \right\} \cdot \bar{e}, \quad (2)$$

где a_0, a_k, b_k – коэффициенты ряда Фурье (таблица 1); $D(\Delta\rho)$ – дисперсия случайной величины; \bar{e} – единичный вектор; $GENR$ – функция, позволяющая учесть отклонение формы профиля оправки от действия случайных факторов.

Анализ результатов моделирования профильных хвостовиков оправок, при статистической обработке, выполнен для 100 реализаций модели формы в рассматриваемых сечениях с учетом конусности. Установлено, что наиболее точным является способ формирования поверхности с равноосным контуром шлифованием прямым плоским кругом. По результатам моделирования допуск угла и формы конуса оправки соответствует пятой степени точности АТ5.

Таблица 1 – Числовые значения коэффициентов ряда Фурье (шлифование прямым плоским кругом)

| к | a_k | b_k |
|---|-----------|-----------|
| 0 | -0.927440 | 0,000000 |
| 1 | -0.002400 | -0.009380 |
| 2 | 0.003660 | -0.017640 |
| 3 | 0.006670 | -0.023760 |
| 4 | 0.003600 | -0.027020 |
| 5 | -0.002560 | -0.027020 |
| 6 | -0.006110 | -0.023760 |

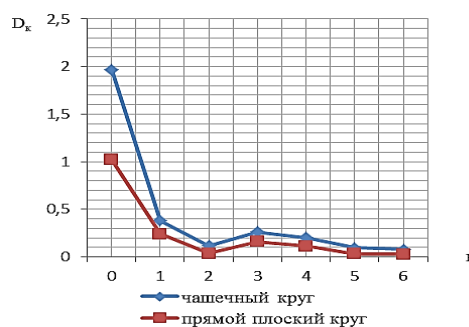


Рисунок 1 – Распределение дисперсий отклонений случайной величины по гармоникам

При определении погрешности формы хвостовиков оправок, которая сформирована во время ее эксплуатации, использованы данные измерений прототипов конических хвостовиков базовых оправок типа SK вспомогательного инструмента многоцелевых станков с ЧПУ с вертикально и горизонтально расположенным шпинделем (РИЗ АО КамАЗ). По результатам статистического анализа данных замеров прототипов оправок, путем разложения в ряды Фурье определены математическое ожидание погрешности формы хвостовиков базовых оправок. Расчеты выполнены для поперечных сечений хвостовиков набора базовых оправок вспомогательного инструмента при разных схемах внешнего нагружения. На рисунках 2 и 3 приведены результаты моделирования отклонений формы для оправки SK 30-27 (фреза дисковая) при действии систематических факторов.

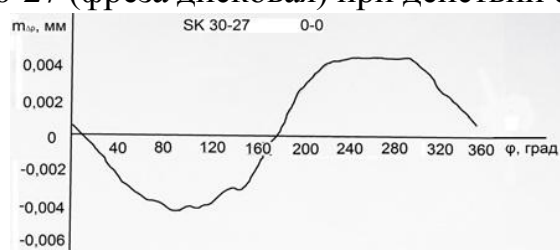


Рисунок 2 – Математическое ожидание отклонения радиус-вектора профиля фрезерной оправки сечение 0-0

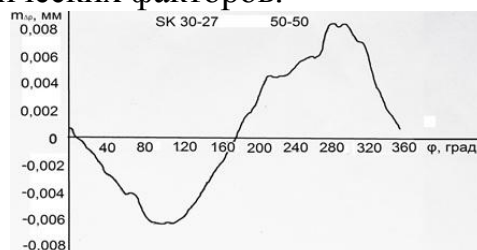


Рисунок 3 – Математическое ожидание отклонения радиус-вектора профиля фрезерной оправки сечение 50-50

По результатам корреляционного и спектрального анализа построены нормированные корреляционные функции и распределение дисперсий случайной величины отклонений геометрической формы по гармоникам для прототипов базовых оправок фрезерно-сверлильно-расточных групп инструмента бывшего в эксплуатации. На рисунке 4 и 5 представлены результаты исследований хвостовика базовой оправки SK 30-27 (фреза дисковая) MC BZ-20 (Германия). По результатам моделирования установлены допуски угла и формы конуса базовых оправок типа SK 30 набора инструмента бывшего в эксплуатации, которые соответствуют АТ6 и АТ8 степени точности в процессе изнашивания при сборке-разборке.

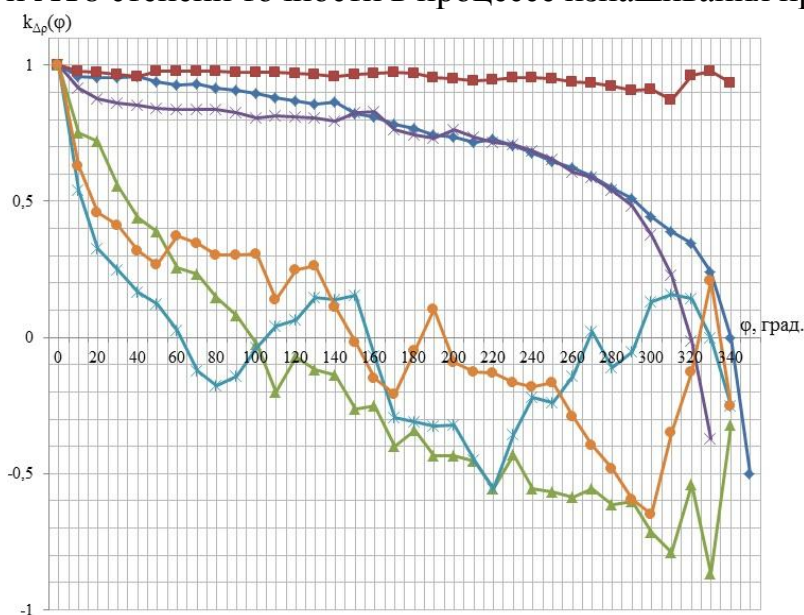


Рисунок 4 – Диаграмма нормированной корреляционной функции

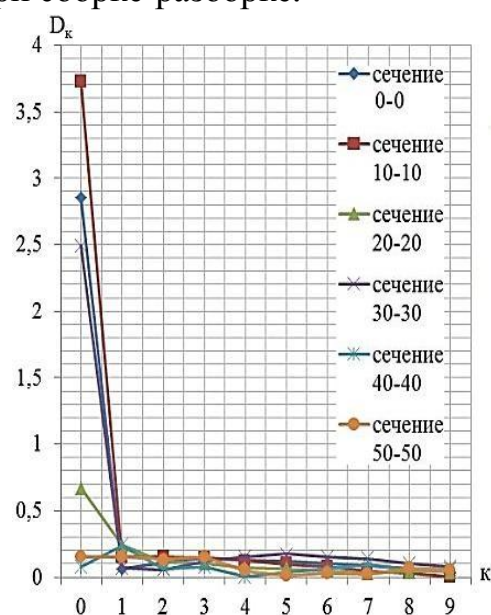


Рисунок 5 – Спектр случайной функции

Установлены функциональные связи между характером нормированной корреляционной функции и внутренней структурой соответствующего ей случайного процесса изнашивания хвостовиков базовых оправок вспомогательного инструмента, который происходит при разных условиях их эксплуатации для одного и того же многоцелевого станка.

На основе полученных данных разработаны математические модели конических хвостовиков базовых оправок типа SK, HSK, P3 и др. размерностью $M \times N = 300 \times 25 = 7500$ точек поверхности (рисунок 6).

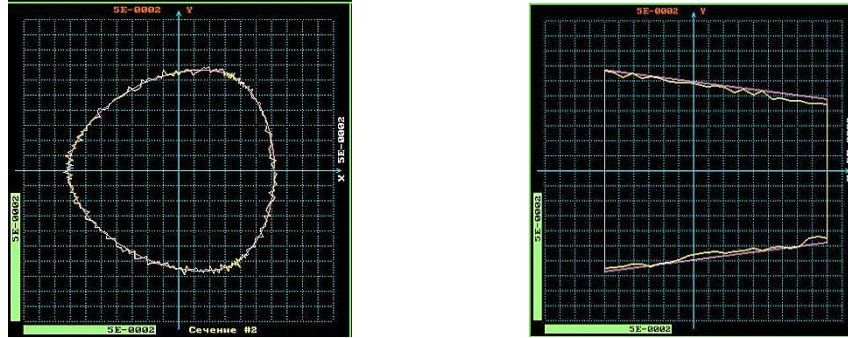


Рисунок 6 – Модель реальной формы конического профильного хвостовика оправки типа P3 конусностью 7:24 (микрogeометрия формы оправки $\times 100$)

Проверка математической модели на адекватность при использовании стандартных программ генерирования случайных чисел по нормальному закону вероятности, как наиболее часто встречающемуся в машиностроении, была проведена по критерию Пирсона. Доверительный интервал 0,05. При определении долговечности математической модели базовой оправки с учетом момента разладки случайного процесса при заданном законе вероятности при воспроизведении геометрической формы применен метод последовательных кумулятивных сумм.

Математические модели базовых оправок применены при разработке имитационной модели конического соединения типа шпиндель-оправка при исследовании процессов многоазового базирования и закрепления вспомогательного инструмента, что позволило определить функциональные связи между входными и выходными переменными системы. Моделирование процесса многоазового базирования и закрепления вспомогательного инструмента проведено для рекомендуемых способов фиксации осевого положения конусов базовых оправок в плоской и объемной постановке для различных условий его нагружения.

При моделировании процесса сопряжения в условиях несвободного движения базовой оправки в отверстии шпинделя, имеющей случайный профиль поверхности, используют известные дифференциальные уравнения второго порядка движения твердых тел. Для вычисления начальных значений решение дифференциальных уравнений движения приводится одношаговым методом Рунге-Кутты с использованием стандартных процедур. В работах В. Шилен и П. Эберхарда указано, что в одношаговых методах наибольшее значение имеет длина шага. Она влияет на погрешность интегрирования.

Система дифференциальных уравнений движения оправки приводится к уравнениям поступательного движения и динамическим уравнениям Эйлера вида:

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{c_z}}{dt} &= \frac{1}{m_e} F_{pz}, & \frac{d\omega_z}{dt} &= \frac{1}{I_{e_z}} \left[M_{pz} - (I_{e_y} - I_{e_x}) \omega_x \omega_y \right], \\
\frac{dv_{c_x}}{dt} &= \frac{1}{m_e} F_{px}, & \frac{d\omega_x}{dt} &= \frac{1}{I_{e_x}} \left[M_{px} - (I_{e_z} - I_{e_y}) \omega_z \omega_y \right], \\
\frac{dv_{c_y}}{dt} &= \frac{1}{m_e} F_{py}, & \frac{d\omega_y}{dt} &= \frac{1}{I_{e_y}} \left[M_{py} - (I_{e_x} - I_{e_z}) \omega_z \omega_x \right],
\end{aligned} \tag{3}$$

где F_{pz}, F_{px}, F_{py} – проекции всех внешних сил приведенных к центру масс на оси координат;

M_{pz}, M_{px}, M_{py} – проекции моментов всех внешних сил относительно центра масс оправки на оси координат;

$I_{e_z}, I_{e_x}, I_{e_y}$ – моменты инерции оправки относительно координатных осей.

Интегрирование векторных уравнений движения выполняется совместным интегрированием шести уравнений (3) в проекциях на оси координат методом численного расчета Адамса.

Для определения координат точек поверхности хвостовика оправки, в системе координат отверстия конца шпинделя (рисунок 7) используются операторы поворота трехмерных векторов относительно осей z, x, y . Операторы представляют собой матрицу преобразования, равную произведению матриц элементарных поворотов на вектор-столбец компоненты. При повороте из системы координат оправки в систему координат отверстия шпинделя на углы $\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y$ используют результирующий оператор поворота вида:

$$\text{Rt}(\bar{\varphi}, \bar{A}) = (\text{Rt}_z, \text{Rt}_x, \text{Rt}_y),$$

$$\begin{aligned}
\text{Rt}_z(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (A_z, A_x \cos(\varphi_z) - A_y \sin(\varphi_z), A_x \sin(\varphi_z) + A_y \cos(\varphi_z)), \\
\text{Rt}_x(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (A_y \sin(\varphi_x) + A_z \cos(\varphi_x), A_x, A_y \cos(\varphi_x) - A_z \sin(\varphi_x)), \\
\text{Rt}_y(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (-A_x \sin(\varphi_y) + A_z \cos(\varphi_y), A_x \cos(\varphi_y) + A_z \sin(\varphi_y), A_y).
\end{aligned} \tag{4}$$

Результирующий оператор обратных поворотов из системы координат отверстия шпинделя в систему координат оправки имеет вид:

$$\text{Rv}(\bar{\varphi}, \bar{A}) = (\text{Rv}_y, \text{Rv}_x, \text{Rv}_z),$$

$$\begin{aligned}
\text{Rv}_y(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (A_x \sin(\varphi_y) + A_z \cos(\varphi_y), A_x \cos(\varphi_y) - A_z \sin(\varphi_y), A_y), \\
\text{Rv}_x(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (-A_y \sin(\varphi_x) + A_z \cos(\varphi_x), A_x, A_y \cos(\varphi_x) + A_z \sin(\varphi_x)), \\
\text{Rv}_z(\bar{\varphi}, \bar{A}) &= (A_z, A_x \cos(\varphi_z) + A_y \sin(\varphi_z), -A_x \sin(\varphi_z) + A_y \cos(\varphi_z)),
\end{aligned} \tag{5}$$

где $A = (A_z, A_x, A_y)$ – компоненты произвольного трехмерного вектора;

$\varphi = (\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y)$ – трехмерный вектор углов поворота.

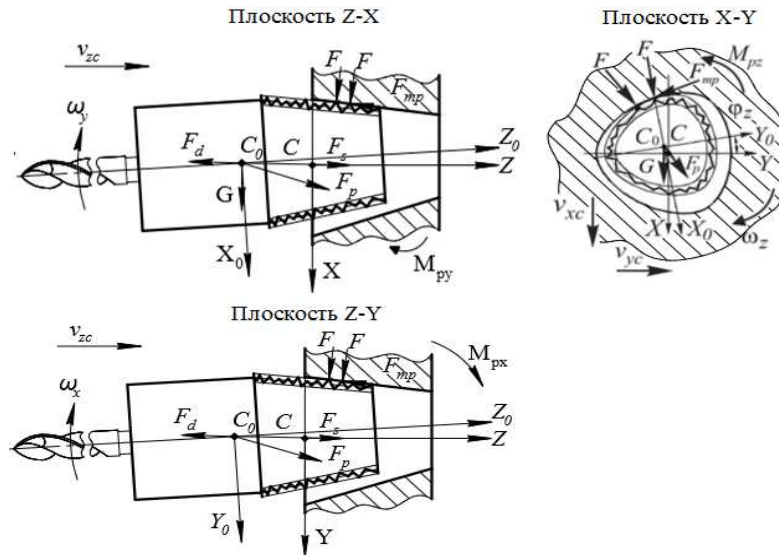


Рисунок 7 – Модель конического профильного соединения типа шпindelь-оправка (текущее положение деталей при сопряжении)

Координаты точек поверхности хвостовика оправки в системе координат отверстия шпинделя с учетом поворотов и смещений центра масс оправки могут быть записаны следующим образом:

$$(z_{mn}, x_{mn}, y_{mn}) = \mathbf{Rt}(\bar{\varphi}, z_{0mn}, x_{0mn}, y_{0mn}) + (z_c, x_c, y_c). \quad (6)$$

Выражение (6) используют при определении величины радиального натяга или зазора в каждой рассматриваемой точке m поперечного сечения n хвостовика оправки с отверстием конца шпинделя. При наличии натяга определяются силы $\bar{F}_{mn} = Rv(\bar{\varphi}, \bar{F}_{mn})$, с использованием формулы Н.М. Михина для случая упругого ненасыщенного контакта и моменты $\bar{M}_{mn} = \bar{R}_{0mn} \times Rv(\bar{\varphi}, \bar{F}_{mn})$. Вводя полученные силы и моменты в систему уравнений (3) определяют скорости движения оправки. С этой целью, с учетом предыдущего шага расчета, необходимо выполнить поворот векторов $\bar{v}_{c,k-1}, \bar{\omega}_{k-1}$ из неподвижной системы координат отверстия шпинделя в подвижную систему оправки. Вычислить новые значения векторов $\bar{v}_{c,k}, \bar{\omega}_k$, и сделать обратный поворот в систему координат отверстия шпинделя. Кинематические параметры движения оправки определяют по формулам экстраполяционного метода Адамса второго порядка точности с учетом операторов поворота оправки:

$$\bar{v}_{c,k} = \mathbf{Rt} \left[\bar{\varphi}_{k-1}, \left(\frac{\Delta t}{m_B} \left(\frac{3}{2} \bar{F}_{p,k-1} - \frac{1}{2} \bar{F}_{p,k-2} \right) + Rv[\bar{\varphi}_{k-1}, \bar{v}_{c,k-1}] \right) \right]. \quad (7)$$

$$\bar{\omega}_{k-1} = Rv[\bar{\varphi}_{k-1}, \bar{\omega}_{k-1}],$$

$$\omega_{z,k} = \frac{\Delta t}{I_{\theta_z}} \left[\left(\frac{3}{2} M_{pz,k-1} - \frac{1}{2} M_{pz,k-2} \right) - (I_{\theta_y} - I_{\theta_x}) \omega_{x,k-1} \omega_{y,k-1} \right] + \omega_{z,k-1},$$

$$\omega_{x,k} = \frac{\Delta t}{I_{\theta_x}} \left[\left(\frac{3}{2} M_{px,k-1} - \frac{1}{2} M_{px,k-2} \right) - (I_{\theta_z} - I_{\theta_y}) \omega_{z,k-1} \omega_{y,k-1} \right] + \omega_{x,k-1}, \quad (8)$$

$$\omega_{y,k} = \frac{\Delta t}{I_{\theta_y}} \left[\left(\frac{3}{2} M_{py,k-1} - \frac{1}{2} M_{py,k-2} \right) - (I_{\theta_y} - I_{\theta_z}) \omega_{z,k-1} \omega_{x,k-1} \right] + \omega_{y,k-1},$$

$$\bar{\omega}_k = \mathbf{Rt}[\bar{\varphi}_{k-1}, \bar{\omega}_k].$$

Основной причиной сложности полученных формул является проведение качественного анализа процессов движения связанных с интегрированием системы дифференциальных уравнений (3) в системе координат оправки и преобразованием векторов скоростей $\bar{v}_{c,k-1}, \bar{\omega}_{k-1}$ из одной системы координат в другую и обратно, что ведет к увеличению расчетов. При этом формула (7), записанная в векторной форме, позволяет проинтегрировать три уравнения линейных скоростей оправки $v_{c_z}, v_{c_x}, v_{c_y}$, а остальные пять формул (8) выполняют интегрирование трех уравнений угловых скоростей $\omega_z, \omega_x, \omega_y$.

Значения величин смещений и углов поворота оправки $\bar{s}_{c,k}, \bar{\varphi}_k$ определяются расчетом в системе координат отверстия шпинделя станка с учетом предыдущего шага расчета $\bar{s}_{c,k-1}, \bar{\varphi}_{k-1}$. В векторной форме итоговое решение системы дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned}\bar{s}_{c,k} &= \left(\frac{3}{2} \bar{v}_{c,k-1} - \frac{1}{2} \bar{v}_{c,k-2} \right) \cdot \Delta t + \bar{s}_{c,k-1}; \\ \bar{\varphi}_k &= \left(\frac{3}{2} \bar{\omega}_{k-1} - \frac{1}{2} \bar{\omega}_{k-2} \right) \cdot \Delta t + \bar{\varphi}_{k-1}.\end{aligned}\quad (9)$$

При принятии всех необходимых параметров моделей и их единиц измерения в СИ в результате решения системы дифференциальных уравнений получены векторы кинематических параметров движения оправки при сопряжении:

$\bar{v}_c = (v_{c_z}, v_{c_x}, v_{c_y})$ – скорость центра масс оправки, м/с;

$\bar{\omega} = (\omega_z, \omega_x, \omega_y)$ – угловая скорость оправки, рад/с;

$\bar{s}_c = (z_c, x_c, y_c)$ – смещение центра масс оправки, м;

$\bar{\varphi} = (\varphi_z, \varphi_x, \varphi_y)$ – угол поворота оправки, рад.

Рассчитанные кинематические параметры движения оправки $\bar{s}_c, \bar{\varphi}, \bar{v}_c, \bar{\omega}$ являются начальными условиями для выполнения следующего $k+1$ шага расчета. Равновесным состоянием оправки, при котором она не может двигаться в отверстии конца шпинделя, является выполнение условий вида:

$$\begin{aligned}\sum \bar{F} &= 0, \quad \bar{a}_c = 0, \quad \bar{v}_c = 0, \\ \sum \bar{M} &= 0, \quad \bar{\varepsilon} = 0, \quad \bar{\omega} = 0.\end{aligned}\quad (10)$$

Уменьшая шаг интегрирования Δt в 200 раз при проведении расчетов в конце моделирования процесса сопряжения оправки и шпинделя, удастся обеспечить выполнение условий (10).

При последовательном интегрировании системы дифференциальных уравнений определяются кинематические параметры движения оправки во времени. Линейные перемещения и угловые повороты оправки, а также линейные и угловые скорости и ускорения определяются при ее движении в течение времени сборки до полной остановки по всем координатным осям. Таким образом, определяется главный вектор направления движения центра масс (ц.м.) оправ-

ки, в текущий момент времени. Задание шага интегрирования приводит к изменению положения координатной системы оправки относительно координатной системы отверстия шпинделя, что определяется новой схемой нагружения на данной ступени итерационного процесса сопряжения. В качестве критерия проверки погрешности решения дифференциальных уравнений, принята «малость» относительного изменения полученного решения при изменении шага интегрирования. При завершении процесса базирования и закрепления базовой оправки в шпинделе, соединению сообщается вращательное движение с заданной угловой скоростью и определяется точность положения вспомогательного инструмента в неподвижной координатной системе станка с учетом действия центробежных и внешних сил (рисунки 8 и 9).

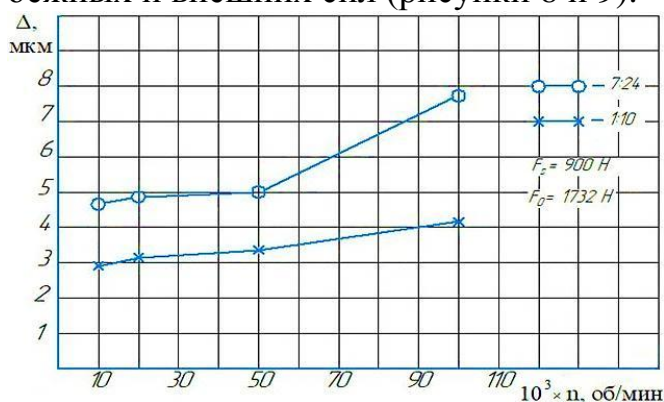


Рисунок 8 – Зависимость математического ожидания поперечных перемещений оправки типа РЗ от скорости вращения шпинделя

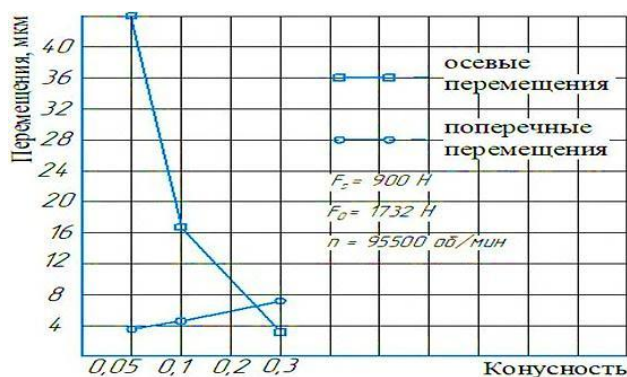


Рисунок 9 – Зависимость математического ожидания перемещений оправки типа РЗ от конусности

В таблице 1 приведены результаты расчетов моментопередающих конических круглых и профильных соединений базовых, переходных и конечных оправок вспомогательного инструмента на поперечную жесткость для рекомендуемых сил закрепления и сил внешнего нагружения.

Таблица 1 – Расчетные величины математического ожидания поперечной жесткости конических соединений, Н/мкм

| Математическое ожидание поперечной жесткости | | | | |
|--|-----------------|----------------------|-----------------|----------------------|
| Тип конуса | SK (BT) | HSK | PSK | P3 |
| 7:24 | от 200 до 400 | Не производится | Не производится | 503,69 |
| 1:10 | 952,30 | от 334,16 до 1084,41 | Не производится | от 951,27 до 1223,06 |
| 1:20 | 858,31 | Не производится | Не производится | 2018,61 |
| Угол уклона 1°15' (1:22,9) | Не производится | Не производится | 2312,79 | Не производится |

Разработанный алгоритм расчета позволяет определять фактическое положение подвижной координатной системы базовой оправки вспомогательного инструмента в неподвижной координатной системе конца шпинделя во времени с учетом вариаций схем нагружения для разных сил закрепления и скорости сборки с учетом отклонений геометрической формы конических хвостовиков

базовых, переходных и конечных оправок. Зависимости упругого отжатия конической профильной базовой оправки типа РЗ по длине посадочной поверхности отверстия конца шпинделя (конус 50), а также фрагмент НДС конического профильного соединения представлены на рисунках 10-12 при величине силы закрепления оправки равной 900 Н, для разных условий внешнего нагружения.

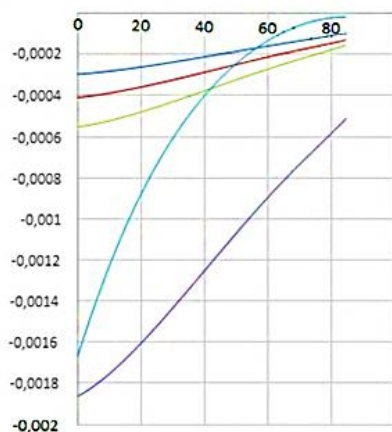


Рисунок 10 – Зависимости упругого отжатия оправки по длине посадочной поверхности отверстия шпинделя при конусности 7:24, мм

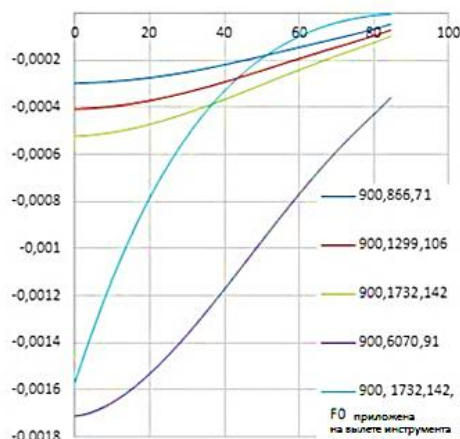


Рисунок 11 – Зависимости упругого отжатия оправки по длине посадочной поверхности отверстия шпинделя при конусности 1:10, мм

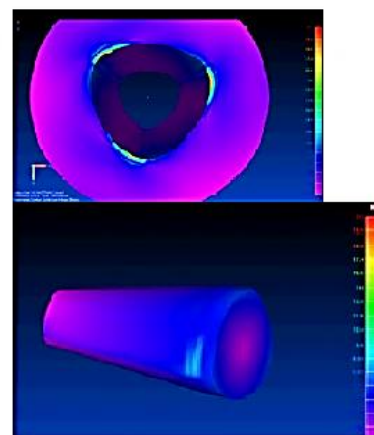


Рисунок 12 – Фрагмент НДС конического профильного соединения типа РЗ

По результатам машинного имитационного эксперимента процесса базирования и закрепления оправок вспомогательного инструмента в отверстии шпинделя, а также статистической обработки полученных результатов (не менее 100 реализаций), производится оценка показателей качества моментопередающих конических профильных соединений шпиндельного узла МС.

В третьей главе диссертации представлено приближенное решение контактной задачи для много связанной области профильного соединения с равноосным контуром на основе численного расчета методом конечных разностей и функций отклика. Решение контактной задачи теории упругости сведено к схеме плоских контактных задач в статической постановке. Известны решения подобных задач в работах Александрова В.М., Малинина Н.Н., Иосилевича Г.Б., Теплового М.И., Аксенова Л.Б., Косова М.Г. и других ученых. Снижение класса расчетной модели эквивалентно «смягчению» граничных условий. Отличительной особенностью решения задачи является определение параметров контакта, когда границы зон контакта заранее не известны, путем применения метода функций отклика.

Определим характер распределения, и величину зазоров в стыке для рассматриваемой грани профильного соединения с равноосным контуром системой уравнений вида:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = (r_{21} - r_{11})(1 - \cos\varphi); \quad -\varphi_1 \leq \varphi \leq 0, \quad (11)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2 = (r_{22} - r_{12})(1 - \cos\varphi); \quad 0 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (12)$$

Тогда с учетом выражений (11) и (12) представим интегральное уравнение совместности перемещений для i -той зоны контакта деталей профильного соединения в виде:

$$\begin{aligned}
 & -2 \cdot (v_1 \cdot r_1 - v_2 \cdot r_2) \cdot \left[\int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cos(\varphi - \varphi') \operatorname{Intg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \right. \\
 & \quad \cdot \cos(\varphi - \varphi') \cdot \operatorname{Intg} \frac{|\varphi - \varphi'|}{2} d\varphi' \left. \right] + (\chi_1 \cdot r_1 - \chi_2 \cdot r_2) \cdot \left[\int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') \cdot \right. \\
 & \quad \cdot \sin|\varphi - \varphi'| d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') \cdot \sin|\varphi - \varphi'| d\varphi' \left. \right] - 2 \cdot v_1 \cdot r_1 \cdot \left[\int_{-\varphi_1}^0 P(\varphi') d\varphi' + \right. \\
 & \quad + \int_0^{\varphi_2} P(\varphi') d\varphi' \left. \right] - 2r_1 \cdot f_{np} \left[\frac{1}{G_1} \left(\int_{-\varphi_1}^0 \sin\varphi' P(\varphi') d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \sin\varphi' \cdot P(\varphi') d\varphi' \right) - \right. \\
 & \quad \left. - \frac{1}{G_2} \left(\int_{-\varphi_1}^0 \cos\varphi' P(\varphi') d\varphi' + \int_0^{\varphi_2} \cos\varphi' \cdot P(\varphi') d\varphi' \right) \right] = f_i - \varepsilon.
 \end{aligned} \tag{13}$$

где $v_{1,2}$; $\chi_{1,2}$ – параметры упругости внутренней и наружной поверхности сопрягаемых тел;

r_1 – радиус наружной поверхности тела (вала);

r_2 – радиус внутренней поверхности тела (отверстия втулки);

$P(\varphi')$ – нормальное давление, действующее в точке контакта;

φ' – угловая координата точки, в которой действует давление;

φ – координата точки, в которой определяется перемещение;

f_{np} – коэффициент пропорциональности;

$G_{1,2}$ – модуль сдвига контактирующих тел;

φ_1 и φ_2 – границы угла контакта;

f_i – функция сближения взаимодействующих поверхностей тел;

$E_{1,2}$; $\mu_{1,2}$ – модули упругости наружной и внутренней поверхностей тел.

При этом известно, что

$$v_{1,2} = \frac{1 - \mu_{1,2}^2}{\pi \cdot E_{1,2}}; \quad \chi_{1,2} = \frac{(1 - \mu_{1,2}) \cdot (1 - 2 \cdot \mu_{1,2})}{2 \cdot E_{1,2}}; \quad G_{1,2} = \frac{E_{1,2}}{2 \cdot (1 + \mu_{1,2})}.$$

Коэффициент пропорциональности равен:

$$f_{np} = \left(\frac{P_t \cdot \rho}{P_n} - h \right) \cdot \frac{1}{\rho \cdot \sin \left(\frac{\arccos h}{\rho} \right)}. \tag{14}$$

При взаимодействии некруглых (профильных) поверхностей тел типа вал-втулка при решении задачи при несимметричном контакте может иметь место два случая, а именно: $-\varphi_1 \leq \varphi \leq 0$ и $0 \leq \varphi \leq \varphi_2$.

В силу того, что кривая с равноосным контуром имеет в каждой точке определенный радиус – вектор $\rho(\varphi)$ и эксцентриситет e , то линия действия равнодействующей от действия нормальных нагрузок не принадлежит началу координат O_1 и поэтому необходимо пересчитать радиусы взаимодействующих поверхностей тел (оправки и шпинделя) относительно центра O_2 , принадлежащего линии действия силы P_{ni} (рисунок 13). Решение контактной задачи при использовании метода конечных разностей и функций отклика позволило определить распределение давлений в стыках соединения (рисунок 14 и 15).

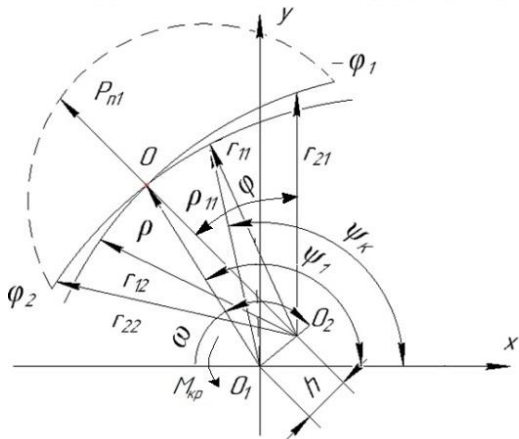


Рисунок 13 – Расчетная схема к определению радиусов контактных поверхностей

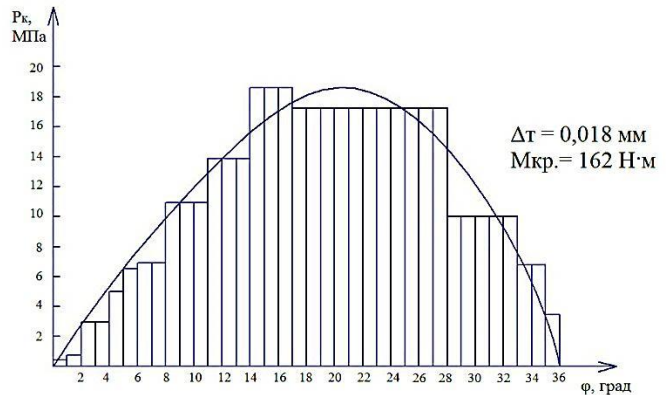


Рисунок 14 – Распределение контактных давлений в профильном соединении при передаче крутящего момента

При анализе результатов решения задачи для разных типов рекомендуемых посадок втулки и вала установлено, что уменьшение зазора в соединении от 228 до 18 мкм способствует увеличению угловой контактной жесткости профильного соединения до 75 %; и уменьшению предельного значения контактного давления в стыках соединения до 13 %. На рисунках 16 и 17 представлены зависимости параметров контакта в профильном соединении от внешней нагрузки для разных значений зазоров в соединении.

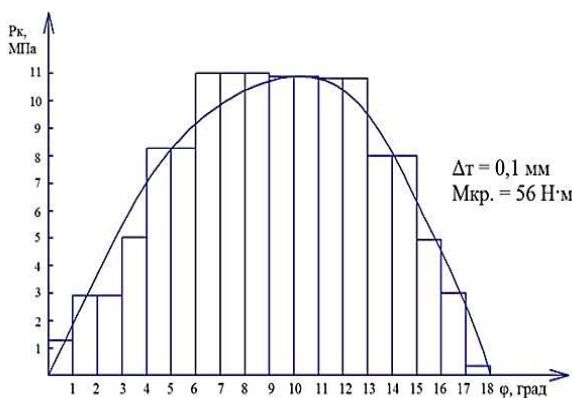


Рисунок 15 – Распределение контактных давлений в профильном соединении при передаче крутящего момента

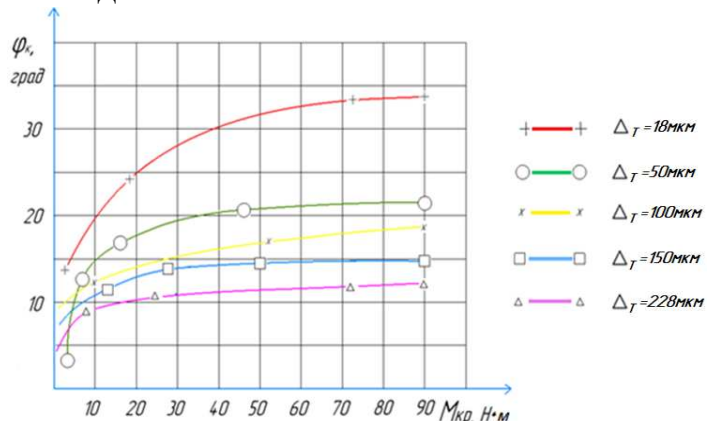


Рисунок 16 – Зависимость величины контактных углов в профильном соединении от внешней нагрузки (крутящего момента)

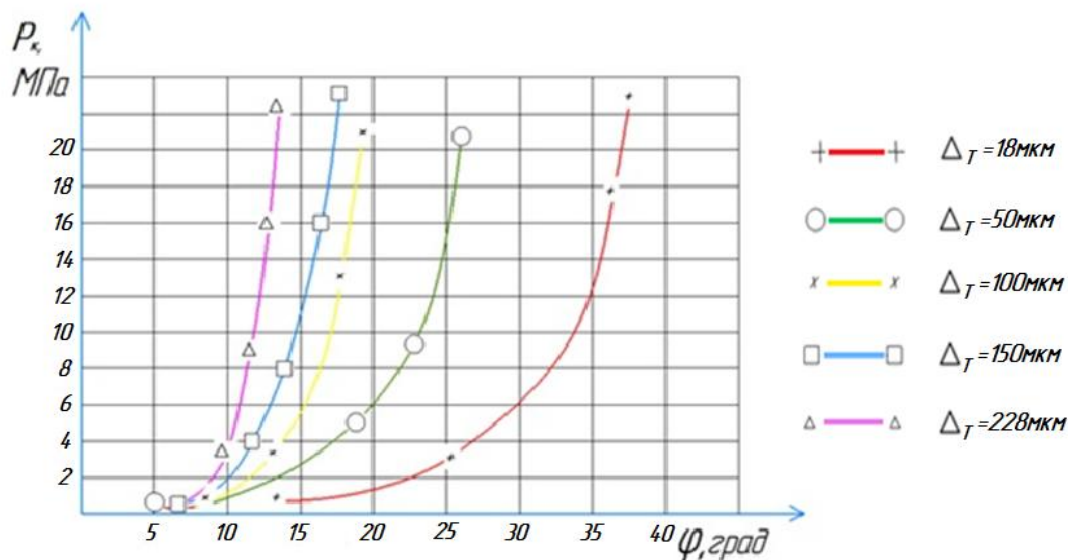


Рисунок 17 – Зависимость величины контактных давлений в профильном соединении от угла контакта

Расчет значений касательных и радиальных напряжений для разных сил закрепления и условий нагружения конического профильного соединения проведен методом конечных элементов с использованием программного обеспечения в среде FEMAP 11.1 with NX NASTRAN на основе конечных элементов в виде восьми узлового изо-параметрического гексаэдра. На рисунках 18 и 19 показаны эпюры распределения напряжений.

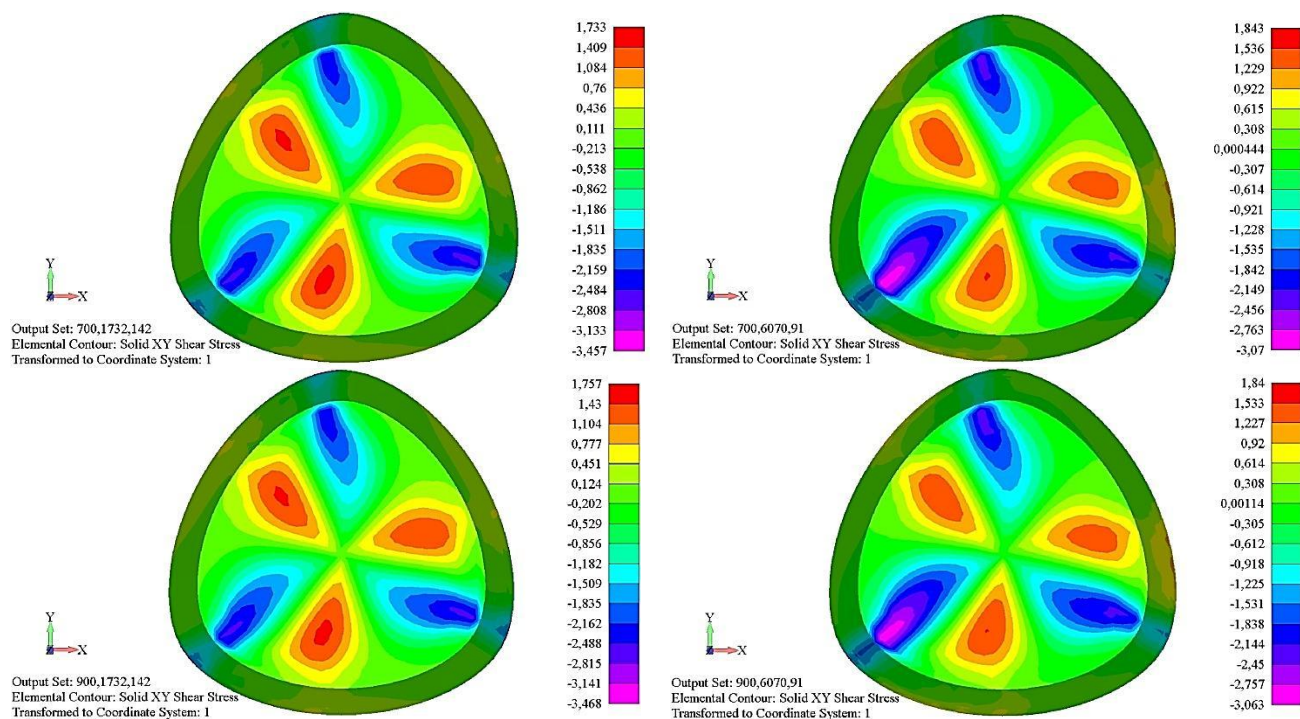


Рисунок 18 – Распределение касательных напряжений в хвостовике оправки типа P3 (конусность 1:10), МПа

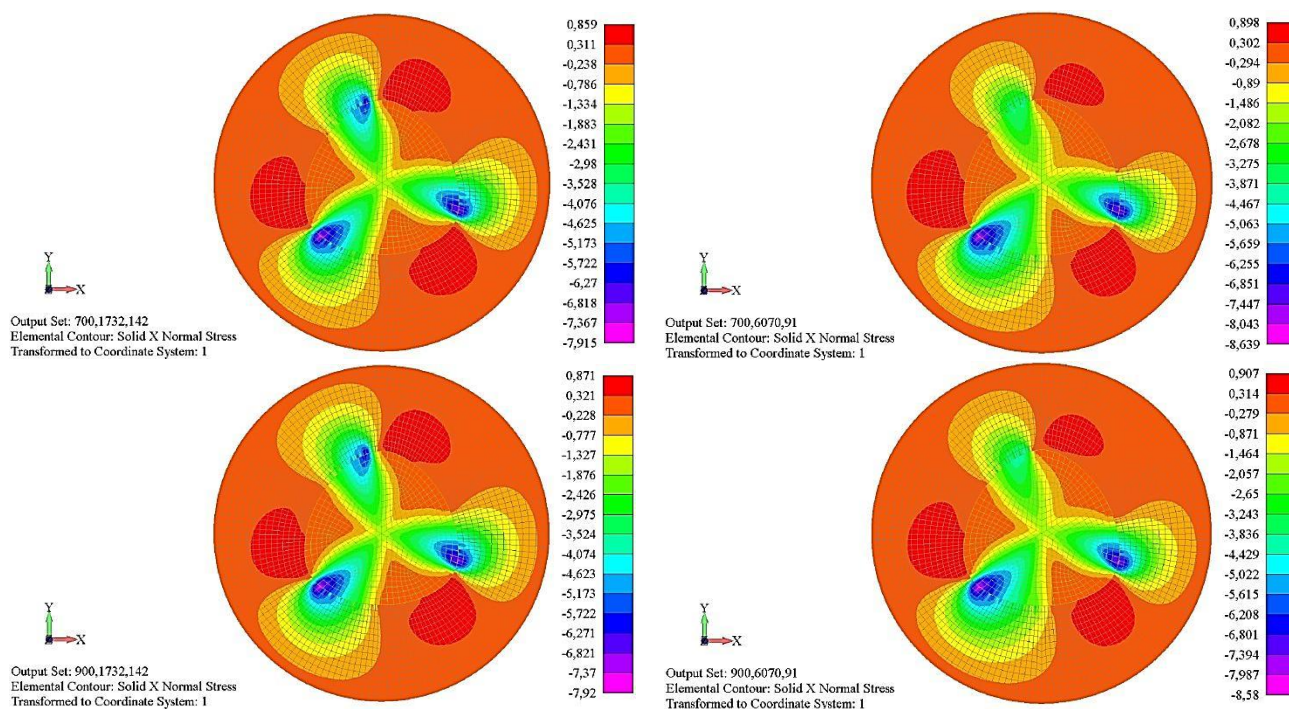


Рисунок 19 – Распределение радиальных напряжений в коническом профильном соединении типа P3 (конусность 1:10), МПа

Анализ НДС конических профильных соединений типа P3 конусностью 1:10 выполненный МКЭ показал, что при фиксации оправки в шпинделе при силе закрепления равной от 700 Н до 900 Н в интервалах действия внешней нагрузки от 866 до 1299 Н и от 1732 до 6070 Н неопределенность базирования не возникает. Зазоры в стыках соединения отсутствуют, и оправка само центрируется в отверстии конца шпинделя. Значение сжимающих радиальных напряжений в зонах контакта лежит в интервале от -7,92 до -8,58 МПа, что удовлетворяет условию контактной прочности стыков соединения. На наружной поверхности конца шпинделя значение растягивающих радиальных напряжений при указанных внешних силах нагружения оправки соединения типа P3 изменяется незначительно от 0,314 до 0,321 МПа.

В четвертой главе диссертации представлены результаты прогнозирования показателей качества конических профильных соединений ШУ МС с учетом отклонений формы деталей соединения в результате изнашивания, сопровождающего процесс многоразовых сборок и разборок соединения при автоматической смене технологических комплектов инструмента. На основе проведенных машинных имитационных экспериментов при использовании математических моделей без учета и с учетом изнашивания посадочной поверхности конического профильного хвостовика базовых оправок вспомогательного инструмента, определены значения параметров точности и контактной прочности конических профильных соединений ШУ для МС с вертикальным и горизонтальным расположением шпинделя.

При изготовлении изделий происходит многоразовая автоматическая смена вспомогательного инструмента, согласно выполняемым технологическим операциям. В процессе закрепления и раскрепления вспомогательного инструмента при замене, происходит механическое изнашивание сопрягаемых по-

верхностей отверстия шпинделя и хвостовика базовых оправок. Значение износа определяет фактическую точность положения инструмента и, соответственно влияет на геометрическую точность станка и показатели качества изготавливаемых изделий. Скорость изнашивания конического профильного соединения определяют с использованием формулы Проникова А.С.:

$$\gamma_{mn} = \frac{\Delta U_{mn}}{\Delta t} = k_{iz} \cdot P_{mn} \cdot v_{sk,mn}, \quad (15)$$

где ΔU_{mn} – линейный износ материала в заданной точке контакта, м; k_{iz} – коэффициент износа, 1/МПа; P_{mn} – контактное давление в заданной точке контакта (m, n), МПа; $v_{sk,mn}$ – относительная скорость скольжения в точке контакта (m, n) при сборке, м/с; Δt – приращение времени, мкс.

Установлено влияние изнашивания поверхности хвостовика базовой оправки при многократной сборке со шпинделем на показатели качества конического профильного соединения.

Моделирование процесса сборки выполнено при способе фиксации осевого положения по силе закрепления равной 900 Н при конусности 1:10 профильного хвостовика базовой оправки относительно отверстия шпинделя станка, а также работы конического соединения ШУ при действии внешней нагрузки равной $F_0 = 1732$ Н для количества $N = 30$ реализаций процесса замены инструмента. Расчетным путем установлены зависимости параметров контакта соединения с учетом износа хвостовика оправки. При моделировании, посадочная поверхность хвостовика базовой оправки описана моделью $M \times N = 300 \times 25 = 7500$ точек контакта при заданной «технологической шероховатости» поверхности равной $Ra = 0,32$ мкм ($\sigma = 0,4$ мкм при моделировании).

Алгоритм расчетов с учетом износа включал следующие этапы.

1. Определение количества контактных точек в сопряжении (рисунок 20).

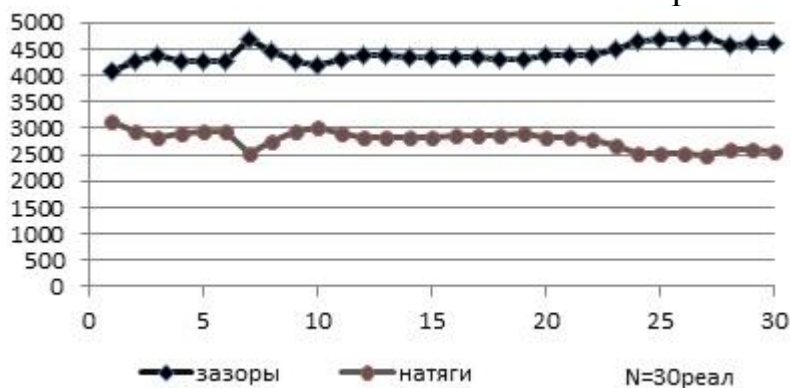


Рисунок 20 – Количество контактных точек в сопряжении

При эксплуатации профильного конического соединения шпиндель-оправка установлено увеличение количества точек контактной поверхности, определяющих зазор и уменьшение количества точек контакта, определяющих натяг вследствие механического изнашивания контактирующих поверхностей.

2. Определение положения базовой оправки относительно отверстия шпинделя по оси Z (рисунок 21).

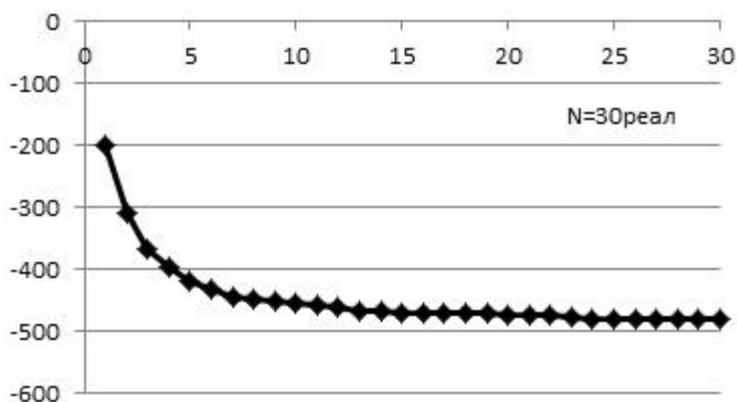
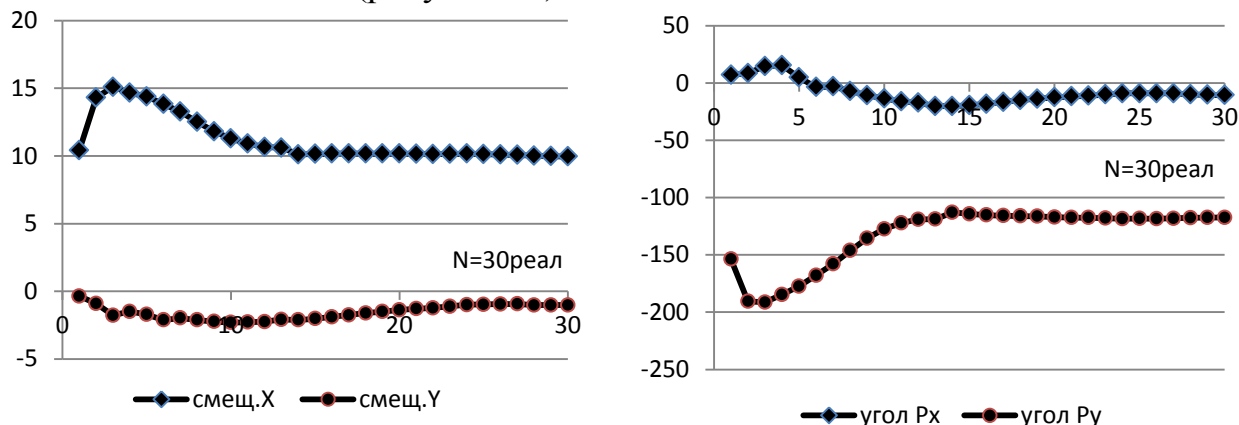


Рисунок 21 – Зависимость линейного смещения ц. м. оправки по оси Z , мкм

В процессе моделирования установлено, что при изнашивании поверхности хвостовика, оправка глубже устанавливается в отверстии шпинделя станка.

3. Определение положения базовой оправки относительно отверстия шпинделя по осям X и Y (рисунок 22).



а) линейное смещение ц. м. оправки по осям X , Y , мкм

б) угловой поворот оправки относительно осей X , Y , мкрад

Рисунок 22 – Линейное и угловое положение оправки относительно отверстия шпинделя

4. Определение значений средних зазоров и натягов в соединении шпиндель-оправка (рисунок 23).

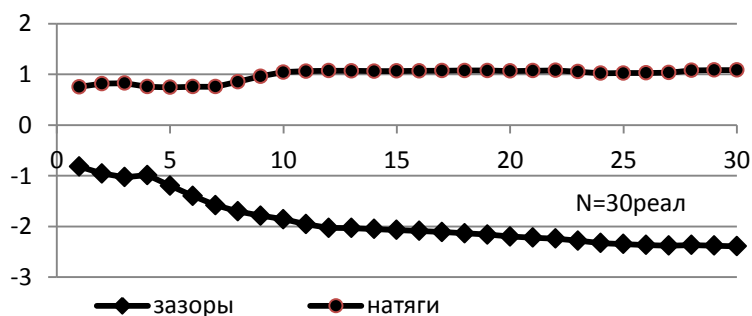


Рисунок 23 – Зависимость средних зазоров и натягов в соединении от количества разъемов соединения, мкм

Анализ полученных результатов (рисунок 20-23) показывает изменение параметров точности и контакта в период приработки деталей конического профильного соединения. Приработка деталей конического соединения происходит на протяжении до 15 реализаций процесса моделирования сборки.

разборок. В результате начальных соударений поверхностей, наиболее высокие выступы изнашиваются, уменьшая тем самым общее количество контактных точек, при этом увеличиваются значения натягов. В дальнейшем при моделировании процесса наблюдается период нормальной эксплуатации соединения.

5. Определение параметров контакта (рисунок 24 и 25).

В период приработки соединения на первых 10-ти реализациях процесса сборок-разборок, происходит изменение относительной площади контакта, среднего и максимального контактного давления, а также времени моделирования процесса сопряжения (рисунок 24 и 25).

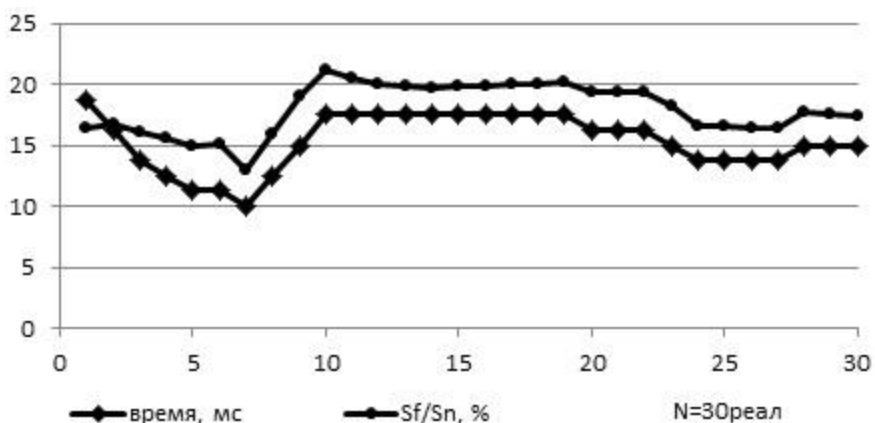


Рисунок 24 – Зависимость относительной площади контакта Sf/Sn (%) и времени моделирования, мс

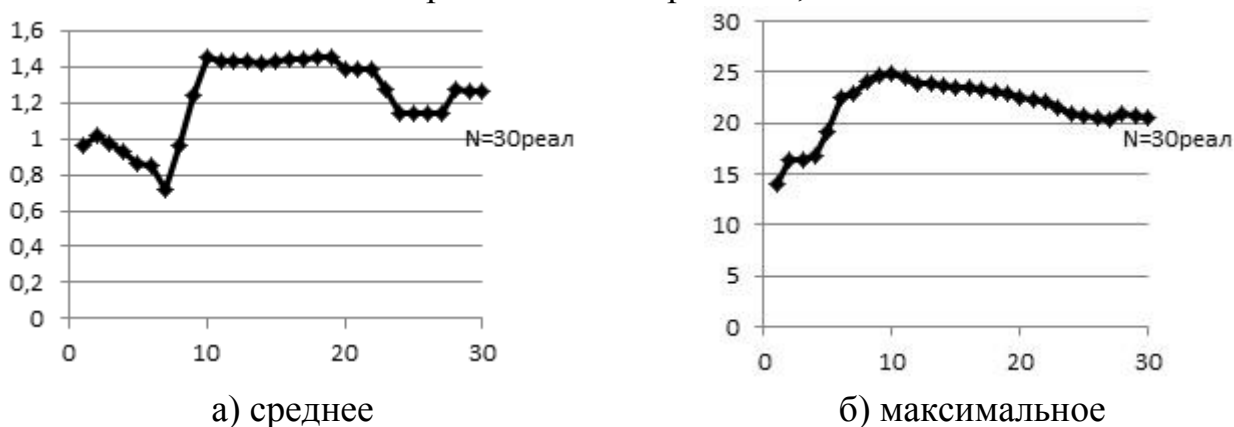


Рисунок 25 – Зависимость контактного давления, МПа

В период нормальной эксплуатации конического профильного соединения установлено уменьшение величины фактической площади контакта с одновременным увеличением значений самих натягов в расчетных точках поверхности хвостовика оправки (рисунок 23 и 24).

Введение поправки на износ позволило адекватно описать изменение микрогеометрии сопрягаемых деталей конического профильного соединения ШУ в условиях многоразовой смены вспомогательного инструмента. Анализ результатов моделирования позволил установить, что в процессе формирования соединения шпиндель - оправка при сборке и разборке наиболее подвержены изнашиванию крайние сечения конуса хвостовика оправки. В процессе моделирования разъемов после 30-реализаций расчетом установлено, что значительный износ поверхности наблюдается в крайнем левом сечении базовой оправки

со стороны большого диаметра (рисунок 26 и 27). Менее значительный износ наблюдается в крайнем правом сечении базовой оправки со стороны малого диаметра, что согласуется с полученными данными измерений микрогеометрии хвостовиков прототипов оправок вспомогательного инструмента сверлильно-фрезерных-расточных групп бывших в эксплуатации, а также расчетными данными математической модели оправок вспомогательного инструмента. На рисунке 26 показаны фрагменты технологической шероховатости поверхности хвостовиков базовых оправок и их реализации до сборки, а также реализации «эксплуатационной» шероховатости после определенного количества сборок.

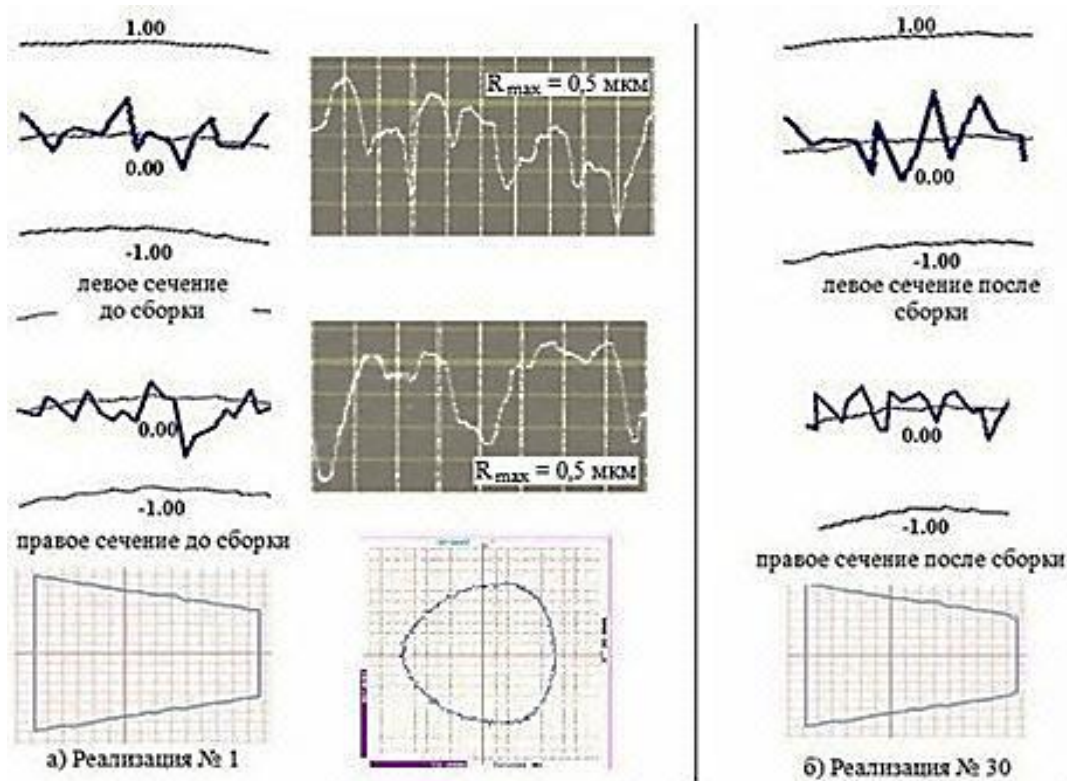


Рисунок 26 – Микрорельеф поперечного сечения профиля конуса хвостовика оправки, до сборки и после многоразовой сборки с учетом износа

На рисунке 27 показаны реализации «эксплуатационной» шероховатости поверхности хвостовиков базовых оправок, а также фрагменты эксплуатационной шероховатости хвостовиков в рассматриваемых сечениях базовой оправки при учете действия дополнительно внешней нагрузки по результатам машинных имитационных экспериментов и измерений. Базовая длина при измерении и оценке микрогеометрии равна 0,8 мм для соответствующих посадочных диаметров оправки. Цена деления одной клетки профилограммы профиля равна 0,1 мкм.

Действие внешней нагрузки, вызывает увеличение среднего контурного давления в коническом соединении и среднего осевого смещения базовой оправки вспомогательного инструмента вдоль оси Z шпинделя станка.

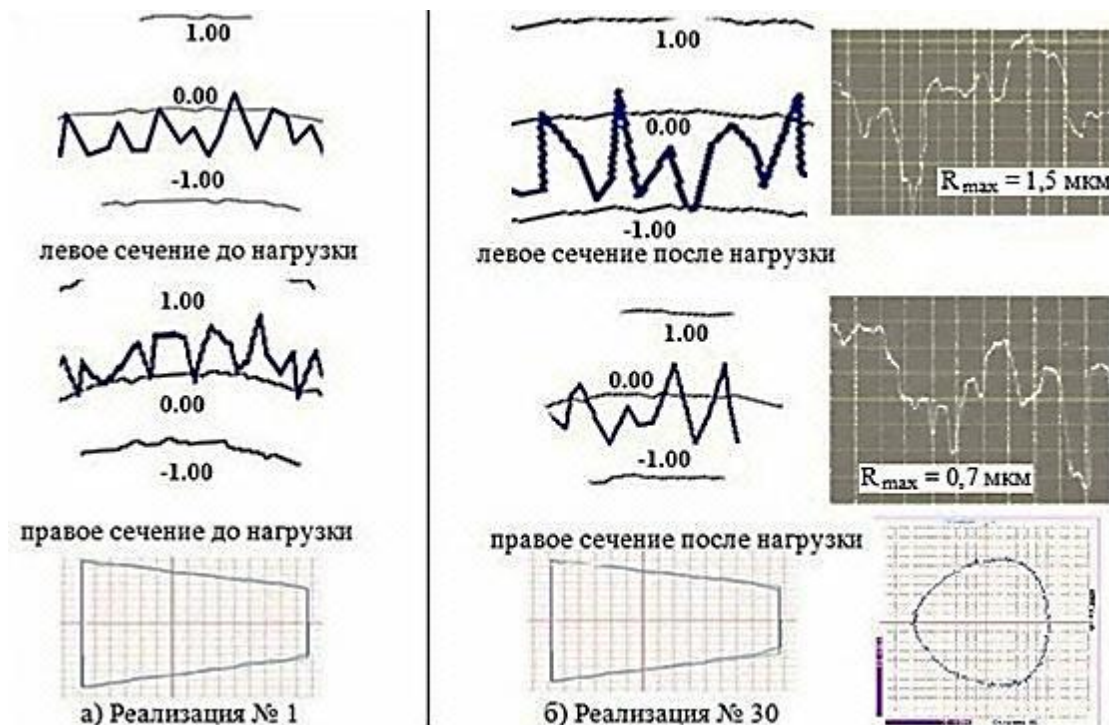


Рисунок 27 – Микрорельеф поперечного сечения профиля конуса хвостовика оправки, с учетом износа при действии внешней нагрузки

В пятой главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований моделей инновационных моментопередающих профильных соединений деталей на основе равноосного контура с числом граней равным трем типа РЗ методом статической фотоупругости.

Широкое распространение при исследовании контактных задач находят методы фотомеханики. Методы фотомеханики, отличающиеся наглядностью, позволяют исследовать не только напряженное-деформированное состояние (НДС) взаимодействующих тел по всему объему и определить составляющие тензора напряжений, но и визуально проследить, как изменяется НДС при изменении положения взаимодействующих тел относительно друг друга при реализации схем нагружения.

Разработанные теории подобия и размерностей в работах М.М. Фрохта, Н.И. Пригоровского, Б.Н. Ушакова, Н.Д. Тарабасова, О.К. Славина и других ученых позволяют решать широкий класс контактных задач и с достаточной степенью точности оценивать напряженное состояние в натуре и модели.

С целью исследования напряженного состояния профильных соединений были изготовлены модели втулки и вала с равноосным контуром из оптически чувствительного материала. В качестве материала применялся оптически-активный компаунд на основе эпоксидной смолы отвержденной малеиновым ангидридом (ЭД-16МА). Толщина пластин материала моделей $b = 6$ мм. Точность определения значений углов контакта и разности главных напряжений обеспечивалась, как технологией изготовления моделей, так и техникой проведения эксперимента. Каждая модель сопряжения №1 и №2 представляла собой втулку и вал с равноосным контуром типа РЗ изготовленные с разными зазорами посадки (рисунок 28 и 29).

Исследование профильного соединения типа РЗ на основе моделей из оптически чувствительных материалов методом статической фотоупругости, позволило оценить влияние величины радиального зазора и условий нагружения, а также величин углов характеризующих положение деталей соединения при косвенном учете отклонений геометрической формы на изменение значений контактного угла и максимальных касательных напряжений в зонах контакта.

В ходе эксперимента фактическое положение профильного соединения по отношению к направлению линии действия радиальной силы изменяли. Предполагалось, что распределение напряжений в зонах контакта при выбранной схеме нагружения зависит от принятого положения характеризуемого углом ψ .

Установлен характер изменения значений контактного угла и максимальных касательных напряжений для каждой из трех зон контакта при передаче профильным соединением крутящего момента, а также при действии дополнительно радиальной силы.

В случае нагружения крутящим моментом характер напряженного состояния зон контакта (стыков) объясняется исключительно отклонениями геометрической формы сопрягаемых моделей соединения. В случае нагружения дополнительно радиальной силой, как отклонением геометрической формы модели, так и перераспределением напряжений в стыках соединения от действия первой (рисунок 28 и 29).

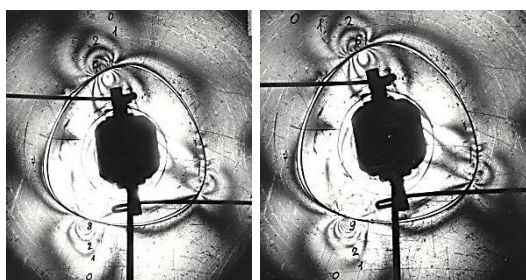


Рисунок 28 – Распределение изохром в моделях соединения №1 при схеме нагружения крутящим моментом и дополнительно радиальной силой

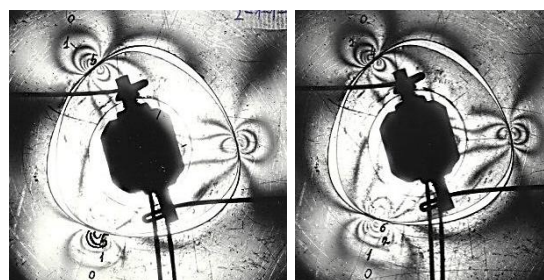


Рисунок 29 – Распределение изохром в моделях соединения №2 при схеме нагружения крутящим моментом и дополнительно радиальной силой

Максимальные касательные напряжения определяют, используя известную зависимость Тимошенко С.П.:

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} \sigma_0 \cdot n, \quad (16)$$

где τ_{\max} – максимальное касательное напряжение;

n – порядок полосы;

σ_0 – цена полосы модели.

Порядок полосы определяют подсчетом количества полос для каждой контактной зоны в соединении из общей картины напряженного состояния, которая фиксируется на фотографии или на экране большой поляризационной установки БПУ – ИМАШ-КБ2.

Цену полосы модели определяют по формуле Фрохт М.М.:

$$\sigma_0 = \frac{\lambda}{2 \cdot c \cdot t} = \frac{\sigma_0^{1.0}}{t}, \quad (17)$$

где $\sigma_0^{1.0}$ – цена полосы материала, равная $\frac{\lambda}{2 \cdot c}$, полученная при толщине модели в 1,0 мм.

Цена полосы материала установлена экспериментально на координатно-синхронном поляриметре КСП-7 методом компенсаций.

По найденным значениям контактных углов и максимальных касательных напряжений, построены соответствующие зависимости для исследуемых моделей №1 и №2 (рисунок 30 и 31).

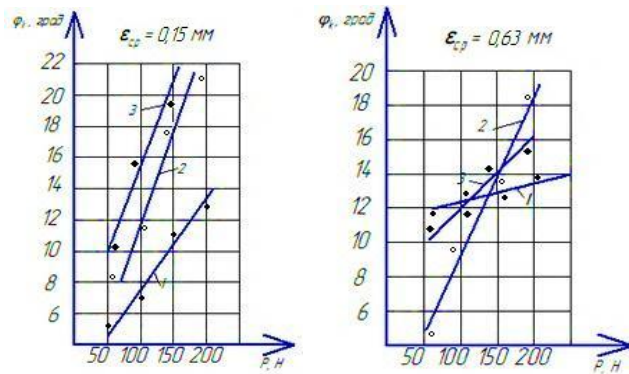


Рисунок 30 – Зависимость величины контактных углов от внешней нагрузки

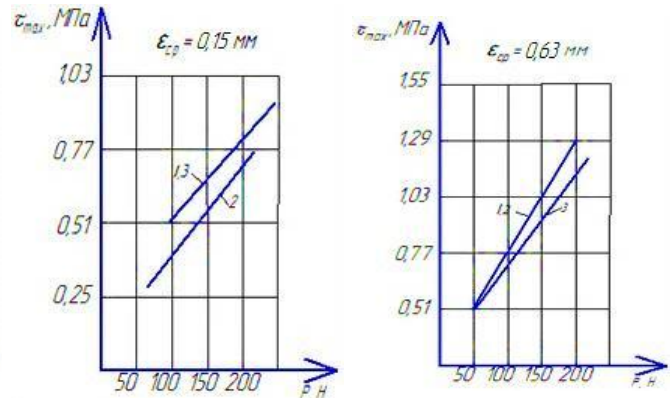


Рисунок 31 – Зависимость величины максимальных касательных напряжений от внешней нагрузки

Для определения влияния радиальной нагрузки на напряженное состояние стыков, проведена сравнительная оценка максимальных касательных напряжений моделей соединения №1 и №2 для наиболее нагруженных зон контакта. Анализ расчета параметров контакта для разных схем нагружения и зазора посадки в соединении показал существенное влияние радиальной составляющей F_r комплексной нагрузки ($M_{кр}$, F_r). Под действием радиальной нагрузки значение максимальных касательных напряжений увеличилась на 37,5 %, при увеличении контактного угла на 36,9 % для модели соединения №1 и модели соединения №2 на 20 % и 24,5 % соответственно.

На практике доказано, что после определенного времени эксплуатации, при действии переменных касательных напряжений, контактная поверхность деталей моментопередающих соединений разрушается при напряжениях ниже тех, которым надежно сопротивляется при действии статической нагрузки.

Для оценки параметров цикла изменения напряжений проведено исследование напряженного состояния контактных зон моделей профильных соединений при нагружении крутящим моментом и, дополнительно радиальной силой при текущем угловом положении последней от 0° до 360° (вращающейся радиальной силе).

Определены коэффициент асимметрии цикла, средние значения и амплитуда разности величин максимальных касательных напряжений, при действии внешней нагрузки за период работы соединения. Установлен пульсационный цикл изменения переменных максимальных касательных напряжений для i -ой контактной зоны соответствующей модели соединения (рисунок 32).

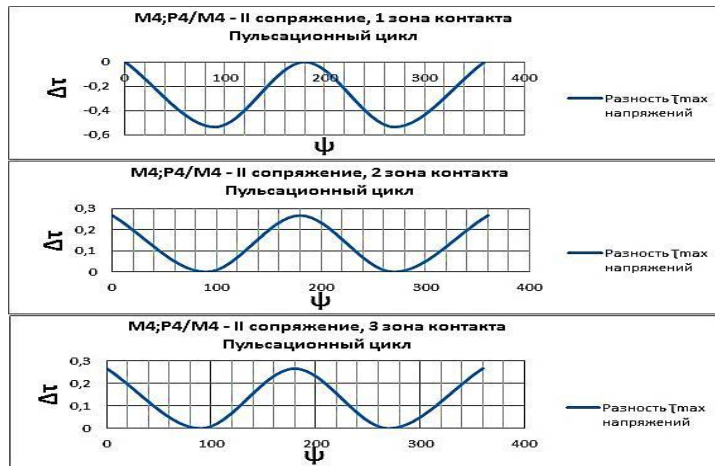


Рисунок 32 – Зависимость изменения касательных напряжений, МПа

Анализ результатов расчетов показал, что изменение переменных максимальных касательных напряжений в зоне контакта при передаче комплексной нагрузки соединением за оборот, подчиняется периодическому закону. Работа профильного соединения при переменных нагрузках, при неверно назначенных зазорах посадки может являться причиной возникновения процесса фреттинг-износа стыков деталей соединения.

В диссертации представлены результаты проведенного натурального экспериментального исследования профильных соединений с равноосным контуром на износ в условиях фреттинг.

В настоящее время нет обоснованной методики проведения натуральных испытаний профильных соединений на фреттинг – износ. Поэтому были приняты во внимание рекомендации ВНИИНМАШ, которые регламентируют методику, режимы и обработку результатов испытаний на контактную усталость образцов из черных и цветных металлов, имеющих временное сопротивление не менее 1000 МПа, или твердость по Бринеллю не менее НВ 300, а также методический документ ИУС 8-1986 взамен отмененного ГОСТ 19533-74.

При проведении натуральных испытаний, в лаборатории технология машиностроения МГТУ (Станкин) были изготовлены две партии профильных соединений по 20 соединений в каждой, с учетом типовых размеров и применяемых материалов (рисунок 33).

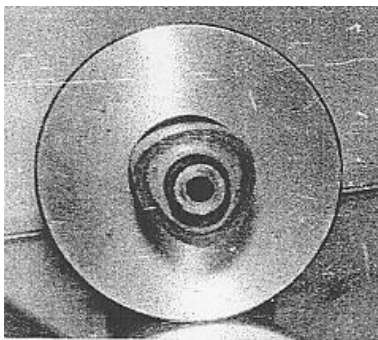


Рисунок 33 – Профильные соединения с равноосным контуром типа P3

С целью исключения влияния собственных деформаций внешний диаметр втулки был принят равным 90 мм, согласно рекомендациям Д.Н. Решетова.

Предложенная методика проведения испытаний давала возможность:

- выявить влияние конструктивных параметров и амплитуды микро перемещений вала, на износ деталей соединения;
- точно смоделировать внешнюю разрушающую нагрузку, действующую в реальном профильном соединении.
- установить характер продуктов износа.

На основе конструкторской документации прототипа машины, предназначенной для испытания отдельных сборочных единиц на усталость при переменном изгибе в одной плоскости, в МГТУ (Станкин) разработан и изготовлен экспериментальный стенд УП-30М2 для исследования профильных соединений с равноосным контуром на износ. Испытания проводились на уровнях нагрузок, обеспечивающих относительное смещение вала относительно втулки в пределах до ± 50 мкм, что характерно для процесса фреттинг-износ.

Оценка результатов натуральных экспериментов на фреттинг-износ проведена с использованием методики Проникова А.С.

Установлено, что вследствие перераспределения действия радиальной нагрузки для более нагруженных поверхностей контакта (граней) соединения имеет место интенсивное изнашивание (рисунок 34).

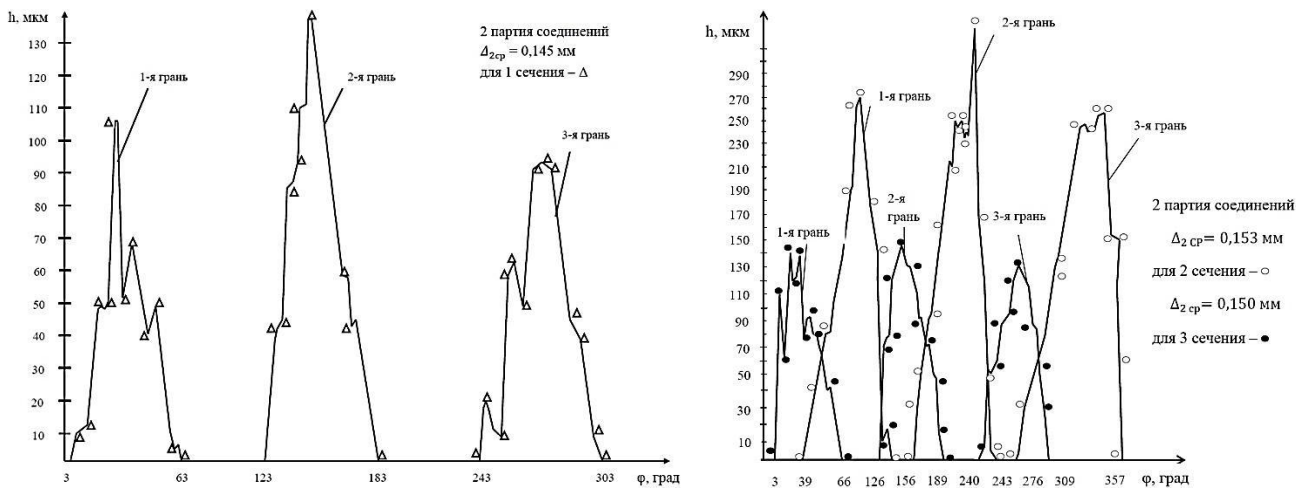


Рисунок 34 – Зависимость износа граней профильного вала в соединении типа P3 (партия соединений 2)

Устройство экспериментального стенда УП-30М2 основано на резонансном принципе возбуждений колебаний. Две нагружающие массы 1 и 2 (рисунок 35 и 36) с жестко закрепленными в них втулками и соединенные между собой профильным валом 3 представляют собой колебательную систему, установленную на спиральных пружинах 4, допускающих колебания в вертикальной плоскости. Колебания полностью поглощаются пружинами. Это исключает необходимость изготовления специального фундамента.

Циклические колебания возбуждаются инерционным вибратором 5, который вмонтирован в одну из нагружающих масс. Вибратор состоит из двух неуравновешенных грузов, эксцентрично закрепленных на валу. Эксцентриситет неуравновешенной массы вибратора может регулироваться. Вибратор приводится во вращение электродвигателем постоянного тока 6. Вал вибратора связан с валом электродвигателя посредством гибкого вала, допускающего относительные поперечные перемещения указанных валов, возникающие во время работы машины. Число оборотов двигателя регулируется с помощью тиристорного преобразователя типа ПТО-М-230-32Э.

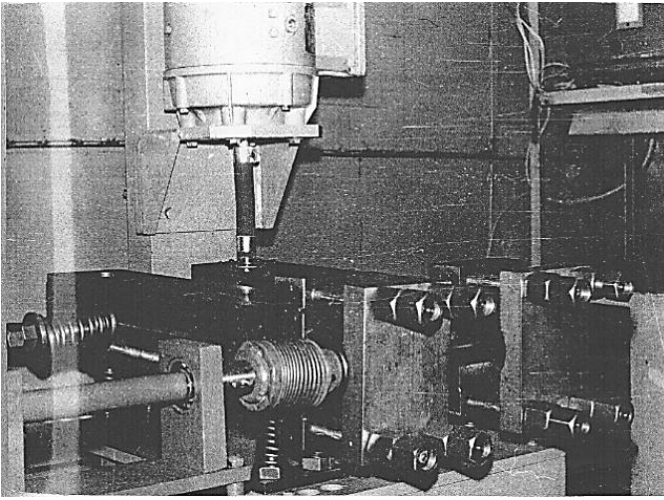


Рисунок 35 – Экспериментальный стенд УП-30М2

Натурные испытания профильных соединений с равноосным контуром на изнашивание для двух типов посадок с зазором показали, что с увеличением зазора в соединении износ граней возрастает (рисунок 37). Это подтверждает основные выводы теории Г. Герца и И.Я. Штаермана о том, что увеличение зазора в стыках приводит к уменьшению фактической площади контакта и увеличению контактного давления.

Профильные соединения находились в фиксированном угловом положении при $\psi = 270^\circ$. Это дало возможность оценить действие радиальной силы в определенный момент времени и значение зазоров посадки на характер изнашивания граней, а также на изменение амплитуды периодических перемещений деталей соединения в процессе проведения эксперимента (таблица 2).

Таблица 2 – Зависимость амплитуды колебаний профильного вала относительно втулки от значения зазора посадки

| Параметры | Партия соединений | | | |
|-----------------------------------|-------------------|------------|------------|------------|
| | 1 | 2 – 1 | 2 – 2 | 2 – 3 |
| $\Delta_{\text{ср}}, \text{ мкм}$ | 70 | 145 | 153 | 150 |
| $\delta, \text{ мм}$ | $\pm 0,005$ | $\pm 0,01$ | $\pm 0,05$ | $\pm 0,03$ |

Экспериментально подтверждено, что уменьшение зазора посадки в профильном соединении с равноосным контуром приводит к уменьшению амплитуды колебаний деталей соединения до ± 5 мкм, что значительно снижает износ граней (рисунок 37 и 38).

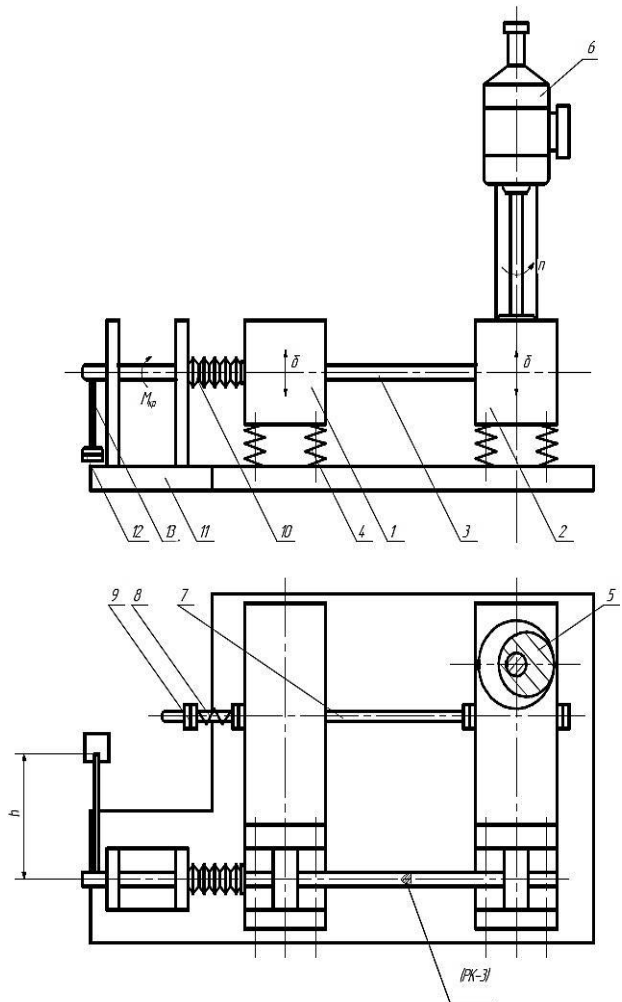


Рисунок 36 – Принципиальная схема экспериментального стенда УП30М2

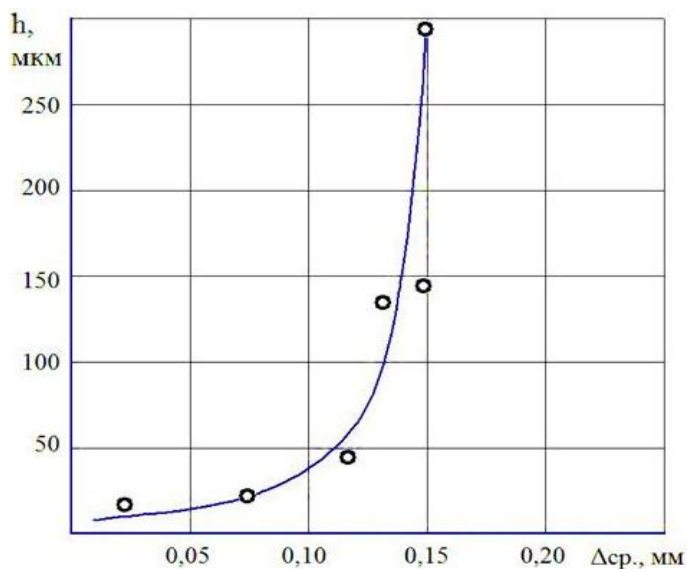


Рисунок 37 – Зависимость износа граней профильного вала от величины зазора посадки в соединении

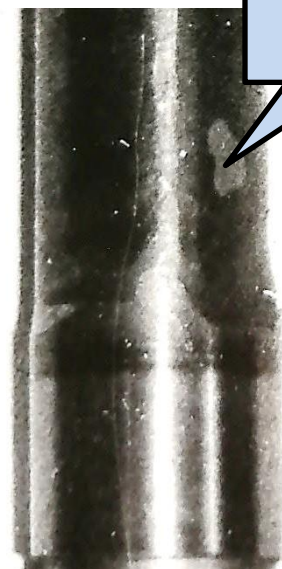


Рисунок 38 – Износ грани профильного вала (зазор посадки 70 мкм)

Из выше полученных результатов следует, что изменение направления радиальной силы внешней комплексной нагрузки, а также неверный выбор и назначение конструктивных параметров (зазоров, натягов) в профильном соединении, приводит к повреждениям и неравномерному износу стыков деталей соединения в условиях колебаний малых амплитуд и является причиной возникновения фреттинг.

В работе разработаны рекомендации выбора рациональных конструктивных параметров конических профильных соединений вспомогательного инструмента. Формализованный алгоритм расчета позволяет на этапе разработки рабочего проекта научно обосновать и определить точность и жесткость возможных сочетаний соединений модулей вспомогательного инструмента и конца шпинделя МС с учетом многих факторов, влияющих на их качественные показатели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе комплексных исследований процессов многократного базирования и закрепления вспомогательного инструмента в шпинделе и последующей эксплуатации, выявлено качественное и количественное отличие при определении работоспособности конических соединений ШУ МС по критериям точность и жесткость. Суть отличия заключается в том, что учет отклонений геометрической формы конической поверхности хвостовиков базовых оправок, при изготовлении и износе в условиях многократной смены вспомогательного инструмента, существенно влияет на точность и жесткость моментопередающих соединений типа шпиндель-оправка. Прогнозирование точности и жесткости конических соединений ШУ МС на стадии проектирования и эксплуатации вспомогательного инструмента, а также при интеграции инновационных решений имеет важное научно-практическое и народно-хозяйственное значение при

разработке станков, обладающих конкурентно способностью на мировом рынке.

2. Разработаны основы теории проектирования конических профильных соединений с равноосным контуром, по критериям повторяемость высокой точности и жесткости при многократном базировании и закреплении вспомогательного инструмента в шпинделе станка. Для оценки и прогнозирования точности и жесткости соединений, модели соединений должны разрабатываться на основе учета систематических и случайных факторов, влияющих на условие сопряжения базовых оправок и шпинделя при смене вспомогательного инструмента с одной стороны, и факторов определяющих точность и жесткость соединений ШУ МС в процессе работы инструмента, с другой стороны. На первом этапе проектирования решена задача по определению фактического положения вспомогательного инструмента при многократном базировании и закреплении в шпинделе, с учетом отклонений от идеальной формы базовых оправок. Учтены технология изготовления (способ формообразования поверхностей), режимы сборки (скорость сборки, величина силы закрепления, способ фиксации), условия сопряжения (силы и моменты трения, исходные условия сопряжения или точность позиционирования инструмента). На втором этапе проектирования решена задача расчета параметров точности и контакта конических профильных соединений шпиндель-оправка, с учетом механического износа хвостовиков базовых оправок, который сопровождает многократные сборки-разборки соединения в процессе эксплуатации.

3. Разработаны математические модели базовых оправок вспомогательного инструмента и имитационная модель конического профильного соединения, которые позволили исследовать процесс сопряжения и оценить погрешность базирования и закрепления оправок в шпинделе во времени. Процесс базирования и закрепления базовой оправки рассмотрен на основе последовательного (рекуррентного) решения системы дифференциальных уравнений второго порядка движения твердых тел, в объемной постановке. Исследованы следующие варианты нагружения конических соединений ШУ:

а) Сборка соединения шпиндель-оправка в квазидинамической постановке, с визуализацией процесса сопряжения во времени. Проведены расчеты выходных параметров процесса сборки, а именно: кинематических параметров движения (траекторий перемещений, линейных смещений и поворотов, угловых и линейных скоростей и ускорений центра масс оправок) и кинетостатических параметров (сил трения, нормальных реакций в точках контакта) при действии сил закрепления.

б) Нагружении, при сообщении соединению шпиндель-оправка вращательного движения с учетом центробежных сил. Определены показатели точности конического соединения для разных скоростей вращения шпинделя станка.

в) Нагружении, при работе моментопередающего конического соединения типа шпиндель-оправка под действием внешней нагрузки.

4) Решена контактная задача теории упругости для много связанных областей контакта профильного соединения в плоской постановке на основе из-

вестных численных методов расчета конечных разностей и функции отклика при решении систем линейных алгебраических уравнений в статике.

5. Определена надежность разработанной математической модели базовой оправки вспомогательного инструмента по показателю долговечность методом кумулятивных сумм. Установлено, что наиболее вероятный момент разладки случайного процесса при воспроизведении геометрической формы оправки в условиях многоразовых смен происходит в диапазоне от 600 до 700 сборок-разборок конического профильного соединения шпиндель-оправка.

6. Установлено, что применение конического профильного соединения типа P3 конусностью 1:10 с фиксацией базовой оправки в шпинделе по величине силы закрепления позволяет по сравнению с соединением типа HSK с фиксацией базовой оправки в шпинделе путем совмещения конструктивных элементов увеличить жесткость от 1,12 до 2,84 раза; по сравнению с соединением типа SK с фиксацией базовой оправки в шпинделе по величине силы закрепления увеличить жесткость от 3,05 до 4,75 раза; по сравнению с применением в соединении базовой оправки с метрическим конусом, соединение типа P3 конусностью 1:10 позволяет увеличить жесткость в 1,42 раза.

7. Установлено, что применение конического профильного соединения типа P3 конусностью 1:20 в переходных и конечных оправках вспомогательного инструмента позволяет по сравнению с соединением нормальной конусностью 1:10 увеличить жесткость соединения в 2,12 раза. По сравнению с профильным соединением типа PSK применение профильного соединения типа P3 в переходных и конечных оправках вспомогательного инструмента имеет тот же порядок жесткости.

8. Установлено, что применение конического профильного соединения типа P3 конусностью 1:10 с фиксацией базовой оправки в шпинделе по величине силы закрепления обеспечивает повторяемость точности сборки в условиях многоразовой смены вспомогательного инструмента, и при передаче внешней нагрузки. Математическое ожидание поперечных и осевых перемещений оправки составляет не более 2,8 и 16 мкм соответственно при числе оборотов шпинделя от 9550 до 10000 в минуту. Математическое ожидание поперечных и осевых перемещений оправки составляет не более 3,5 и 16 мкм соответственно при числе оборотов шпинделя от 10000 до 48000 в минуту.

9. Проведенные комплексные экспериментальные исследования НДС моделей профильных соединений изготовленных из оптически чувствительных материалов с использованием метода статической фотоупругости и натурные испытания профильных соединений на износ позволили классифицировать процессы разрушения посадочных поверхностей деталей моментопередающих профильных соединений с равноосным контуром, работающих в условиях переменных напряжений как процессы фреттинг.

10. Разработанный программно – математический комплекс для оценки точности и жесткости конических профильных неподвижных разъемных соединений шпиндельных узлов следует рекомендовать в проектных решениях задачи совершенствования конструкций вспомогательного инструмента и кон-

цов шпинделей многоцелевых станков с ЧПУ и прогнозировании показателей их качества точности и жесткости.

Публикации в рецензируемых изданиях из «Перечня ...» ВАК

1. **Ильиных, В.А.** Оценка влияния конструктивных параметров на напряженное состояние стыков РК – профильных соединений поляризационно-оптическим методом (статья) / **В.А. Ильиных, М.Г. Косов** // Вестник машиностроения №11. Москва: Машиностроение, 1990.-С.64-66.

2. **Ильиных, В.А.** Метод расчета конических соединений многоцелевых станков / Вестник ЧитГУ. Технические науки, экономика, компьютерные и образовательные технологии.- Чита: ЧитГУ, Выпуск 8, 1998.- С. 87-93.

3. **Ильиных, В.А.** Расчет напряженно-деформированного состояния ступицы с РК – профильным отверстием (статья). / **В.А. Ильиных, В.Ю. Линейцев, Е.А. Рожкова** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. Иркутск: ИрГУПС. – 2010, №3 С. 69-73.

4. Рожкова, Е.А. Изготовление образцов и разработка экспериментального стенда для испытания РК-3 профильного соединения на прочность. / Е.А. Рожкова, **В.А. Ильиных** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - Иркутск: ИрГУПС.- №3(31).-2011.-С.84-87.

5. **Ильиных, В.А.** Расчет на прочность РК – 3 профильных соединений с натягом / **В.А. Ильиных, В.Ю. Линейцев, Е.А. Рожкова** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.- Иркутск: ИрГУПС, 2012, №2 (34), С. 17-20.

6. Линейцев, В.Ю. Имитационное моделирование деталей конического соединения на основе РК-3 профильных кривых / В.Ю. Линейцев, **В.А. Ильиных** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование, - Иркутск: ИрГУПС.- №2.- 2015. - С. 51-56.

7. Рожкова, Е.А. Анализ напряженно-деформированного состояния деталей РК – 3 профильного соединения с натягом методом конечных элементов (МКЭ) / Е.А. Рожкова, **В.А. Ильиных, В.Е. Ярилов** // Вестник СамГУПС – Самара: СамГУПС. - № 4(34) - 2016. – С.35 – 41.

8. Линейцев, В.Ю. Исследование конических РК-3 профильных соединений на точность и жесткость / В.Ю. Линейцев, **В.А. Ильиных, В.Е. Ярилов** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. - №1(53). - 2017.- С.36-39.

9. Линейцев, В.Ю. Учет износа при имитационном моделировании сборки РК-3 профильных конических соединений / В.Ю. Линейцев, **В.А. Ильиных** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. - Иркутск: ИрГУПС. - №2(54). - 2017.- С. 26-30.

10. Пшеничникова, Н.А. Корреляционно - спектральный анализ погрешности формы деталей профильных соединений / Н.А. Пшеничникова, **В.А. Ильиных, В.Ю. Линейцев**// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск: ИрГУПС. - 2018. - Т. 58 № 2. - С. 40-45. –DOI: 10.26731/1813-9108.2018.2(58).40-45.

11. **Ильиных, В.А.** Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений / **В.А. Ильиных**, В.Е. Ярилов, Е.А. Рожкова // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019; 23(3):451-462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462.

12. **Ильиных, В.А.** Применение конических профильных соединений шпиндель-оправка в многоцелевых станках // Омский научный вестник. 2021. №1 (175). С. 12-16. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-12-16.

13. **Ильиных, В.А.** Влияние конструктивно-технологических факторов на параметры контактного взаимодействия конических профильных соединений шпиндельных узлов многоцелевых станков с ЧПУ / **В.А. Ильиных** // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – №1 (69). – С. 10 – 17. - DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).10-17.

14. **Ильиных, В.А.** Экспериментальные исследования профильных соединений деталей машин в условиях циклического нагружения // Омский научный вестник. 2021. № 5 (179). С. 24–28. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-179-24-28.

15. **Ильиных, В.А.** Анализ вибраций опор качения механизмов машин / **В.А. Ильиных**, В.Ю. Линейцев // Омский научный вестник. 2022. № 3 (183). С. 28–31. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-183-28-31.

В изданиях, рекомендованных ВАК по смежным специальностям:

16. **Ильиных, В.А.** Влияние конических профильных соединений на точность и жесткость технологических комплектов многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. т.24. № 4. С.150-159. DOI: 10.18721 / YEST.24415.

17. Пшеничникова, Н.А. Применение метода кумулятивных сумм при оценке погрешности формы профильных валов / Н.А. Пшеничникова, Н.В. Пешков, **В.А. Ильиных** // Научно-технический вестник Поволжья. №1 2019. – Казань ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2019. – С. 126-128.

18. **Ильиных, В.А.** Статистический анализ геометрии профильных деталей шпиндельного узла многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. т.25. № 2. С.132-140. DOI: 10.18721/JEST.25210.

19. **Ильиных, В.А.** Оценка точности конических профильных соединений вспомогательного инструмента многоцелевого станка при высокоскоростной обработке // Материаловедение. Энергетика. 2020. т. 26, № 2. С. 140–147. DOI: 10.18721/JEST.26211

20. **Ильиных, В.А.** Влияние смазочных материалов с минеральными добавками на трение в опорах шпиндельных узлов // Омский научный вестник. 2021. № 6 (180). С. 11–15. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-180-11-15.

21. Носальская, Т.Э. Разработка математической модели реальной поверхности конического вала с учётом момента разладки / Т.Э. Носальская, Н.В. Пешков, **В.А. Ильиных**, В.Ю. Линейцев // Научно-технический вестник По-

волжья. №2 2023. – Казань ООО «Научно-технический вестник Поволжья», 2023. – С. 13-20.

Монография

22. Рожкова, Е.А. Теория и методы проектирования профильных неподвижных неразборных соединений с равноосным контуром с натягом: монография / Е.А. Рожкова, **В.А. Ильиных**, С.В. Четвериков. – Чита: ЗаБИЖТ, 2016. – 168 с. ISBN 978-5-9908860-2-5.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus, WoS:

23. Sakharov, G.N., **Ilinykh V.A.**, Konyukhov Yu.V. Improvement of fastening elements in an assembled cutting tool. – Soviet Engineering Research. 1990. Т. 10. № 11. С. 102.

24. **Ilinykh, V.A.** Evaluation of quality parameters of conical profile compounds in nodes of multi-purpose machines. – E3S Web of Conferences 140, 02003 (2019) EECE – 2019.

25. **Ilinykh, V.**, Pichuev E. Evaluation of quality parameters of the torque transmission connections of the multi-purpose machine spindle joints – Materials Science and Engineering 896 (2020) 012102 doi:10.1088/1757-899X/896/1/012102 MPCPE – 2020.

26. **Ilinykh, V.A.** Experimental study of profile connections of auxiliary tool multi-purpose machines in cyclic loading – Materials Science and Engineering 760, 012025 (2020) SibTrans – 2020.

Охранные документы на результаты интеллектуальной собственности

27. **Ильиных, В.А.**, Косов М.Г., Тарасов А.В. Способ определения времени работоспособности пары трения. Авторское свидетельство СССР №1472787 от 12.01.89 г.

28. Лукьянов, П.Ю. Свидетельство об отраслевой регистрации программы для ЭВМ. Моделирование сопряжений деталей конического соединения / Лукьянов П.Ю., **Ильиных В.А.**, Линейцев В.Ю. – № 5948 от 30.03.06.

29. Патент № 142049 Российская Федерация, МПК F16D 1/06 (2006.01). Профильное соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом: № 2013149425; заявл. 06.11.13 : опубл. 20.06.2014 / Е.А. Рожкова, **В.А. Ильиных**, В.Ю. Линейцев; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

30. Патент № 155119 Российская Федерация, МПК F16D 1/06 (2006.01) Модифицированное профильное моментопередающее соединение вал-ступица с равноосным контуром с натягом : № 2015107771/11, заявл. 05.03.2015: опубл. 20.09.2015 / **В.А. Ильиных**, Е.А. Рожкова, В.Ю. Линейцев; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

31. Патент № 164678 Российская Федерация, МПК F16D 1/08 (2006.01) Глухая втулочная муфта на основе профильного конического соединения : № 2016112226/11; заявл. 31.03.2016 : опубл. 10.09.2016 / **В.А. Ильиных**, В.Ю. Линейцев, Е.А. Рожкова, В.Е. Ярилов; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

32. Линейцев, В.Ю. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Имитационное моделирование сопряжения деталей кониче-

ского соединения / Линейцев В.Ю., **Ильиных В.А.**, Ярилов В.Е. - № 2017615937 от 26.05.2017.

33. Патент № 184076 Российская Федерация, МПК F16D 1/08 (2006.01) Шпиндель-инструментальная оправка на основе конического фасонного соединения : № 2018109190; заявл. 14.03.2018 : опубл. 15.10.2018 / **В.А. Ильиных**; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

34. Патент № 190690 Российская Федерация, МПК F16D 1/06 (2019.02) Модифицированная инструментальная оправка многоцелевого станка : № 2019107254; заявл. 13.03.2019 : опубл. 09.07.2019 / **В.А. Ильиных**, Е.А. Рожкова, В.Ю. Линейцев, В.Е. Ярилов; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

35. Патент № 195759 Российская Федерация, МПК G01B 3/56 (2006.01) Калибр для контроля внутренних фасонных конических поверхностей шпинделя многоцелевого станка : № 2019127591; заявл. 30.08.2019 : опубл. 05.02.2020 / **В.А. Ильиных**, Е.А. Рожкова; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

36. Патент № 205596 Российская Федерация, МПК B23Q 3/12 (2006.01), B23V 31/02 (2006/1) Шпиндель-инструментальная оправка на основе конического профильного соединения : № 2020141250; заявл. 14.12.2020 : опубл. 22.07.2021 / **В.А. Ильиных**, Е.А. Рожкова, В.Ю. Линейцев; заявитель и патентообладатель ИрГУПС.

Публикации в прочих изданиях

37. **Ильиных, В.А.** Численное моделирование процесса механического сопряжения деталей / **В.А. Ильиных**, П.Ю. Лукьянов, А.А. Лукьянова // Сборник научных трудов: Дифференциальные уравнения и аналитическая теория, г. Чита: ЧитГУ, 1999.- С. 63-67.

38. Линейцев В.Ю. Исследование процесса механического сопряжения «инструментальная оправка - шпиндель» многоцелевого станка / В.Ю. Линейцев, **В.А. Ильиных**, П.Ю. Лукьянов // Межвузовский сборник научных трудов: Актуальные проблемы профессионального образования: опыт, перспективы, состояние, тенденции М: МГОУ, т.3, 2004.- С. 111-117.

39. **Ильиных, В.А.** Статистическая оценка погрешности формы конических валов (на примере оправки NSK 30-27) / **В.А. Ильиных**, Н.А. Пшеничникова // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы восьмой международной научно-практической конференции, 28 марта – 01 апреля 2017 г. Иркутск: В 2 т., т.1 - Иркутск: ИрГУПС, 2017, С. 431-435.

40. **Ильиных, В.А.** Применяемые типы посадок в профильных соединениях деталей машин / **В.А. Ильиных**, Е.А. Рожкова, Е.П. Пичуев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: Материалы десятой всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 21 - 24 мая 2019 г. Иркутск: В 2 т., т.2 - Иркутск: ИрГУПС, 2019, С.177-181.