

**ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.2.001.02**

26 декабря 2023 г.

Повестка дня

**ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ Подкругляк Любови Юрьевны  
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

**«ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОХОДНОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА  
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ»**

Специальность:

**2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки**

**Официальные оппоненты:**

**Кузнецов Александр Павлович**, доктор технических наук, советник Генерального директора ООО «КЕВ-РУС», г. Дзержинск, Московская обл.;  
**Добряков Владимир Анатольевич**, кандидат технических наук, с.н.с., доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., г. Саратов;  
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург



На заседании совета из 15 членов диссертационного совета присутствует 11 человек, кворум у нас 10, необходимый кворум имеется. По специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки на заседании присутствует восемь докторов наук. Значит, наше заседание правомочно.

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Подкругляк Любови Юрьевны по теме: «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния». Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель доктор технических наук, профессор Денисенко Александр Федорович, профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» Самарского государственного технического университета.

Официальные оппоненты:

Кузнецов Александр Павлович, доктор технических наук, советник генерального директора ООО «КЭВ-РУС» г. Дзержинский, Московская область;

Добряков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, с.н.с., доцент кафедры «Техническая механика и механотроника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», г. Саратов.

Письменные согласия оппонентов на оппонирование данной работы были в своё время получены. Но сегодня впервые сложилась ситуация, которой никогда раньше не было, заключающаяся в том, что оба оппонента, которые дали положительные отзывы на диссертацию соискателя, по уважительной причине не могут присутствовать в очном режиме на нашем заседании. Мы с Вами можем принять решение о проведении защиты в отсутствие по уважительной причине оппонентов. Это можно сделать на основании постановления Правительства РФ № 426 от 20 марта 2021 г. Согласно этому постановлению, в положение о присуждении ученых степеней от 2013 г. внесены изменения, которые звучат так: диссертационный совет может принять решение о проведении защиты диссертации в отсутствие по уважительной причине (состояние здоровья, отпуск, командировка и другие причины, признанные диссертационным советом уважительными) оппонентов, давших на диссертацию положительный отзыв. В этом случае на заседании диссертационного совета полностью оглашается отзыв отсутствующего оппонента. На защите диссертации по решению диссертационного совета оппоненты по диссертации могут присутствовать в удаленном интерактивном режиме (из-за состояния здоровья, в случае отпуска, командировки и наличия других причин, признанных диссертационным советом уважительными). Напомню, что в старом положении было написано, что оппоненты обязаны присутствовать на защите диссертации, и только лишь один из них может по

уважительной причине не участвовать в заседании Совета. Также обращаю внимание на еще одно изменение - на защите диссертации по решению, опять-таки, диссертационного совета оппоненты могут присутствовать в удаленном интерактивном режиме в случае уважительной причины о невозможности участия в очном режиме. Поэтому мы с вами должны сегодня принять решение о проведении защиты диссертации Подкругляк Любови Юрьевны в отсутствие в очном режиме по уважительной причине оппонентов Кузнецова Александра Павловича и Добрякова Владимира Анатольевича и участия их в работе диссертационного совета в удаленном интерактивном режиме. За это решение мы должны проголосовать. Кто за? Прошу проголосовать. Против? Нет? Выдержался? Принимается единогласно. Оба оппонента для участия в заседании совета в интерактивном режиме своевременно прислали соответствующие заявления, которые предусмотрены на данный вид участия.

Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург.

Слово представляется ученому секретарю совета, доктору технических наук Веткасову Н.И. для оглашения документов из личного дела соискателя. Пожалуйста, Николай Иванович.

**Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Веткасов Н.И.**

Уважаемый председатель, уважаемые члены диссертационного совета! Соискателем Подкругляк Любовью Юрьевной представлены в Совет все необходимые документы к защите, которые оформлены в соответствии с установленными требованиями ВАК. Основные положения отражены в 14 печатных работах по теме диссертации, в том числе 4 опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК и 3 статьи, входящие в систему цитирования Scopus. Соискатель представлен к защите 24 октября 2023 года, протокол № 78. Объявление о защите размещено на сайте ВАК 26 октября 2023 года.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Есть ли вопросы к ученому секретарю совета? Нет. Есть ли вопросы к соискателю? Нет. Любовь Юрьевна, Вам предоставляется слово для доклада основных положений Вашей диссертации.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Добрый день, уважаемые члены диссертационного совета! Вашему вниманию предлагается диссертация на тему «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния».

Основной тенденцией совершенствования конструкций современных металлорежущих станков (МРС) является повышение их быстроходности, обеспечивающей рост производительности обработки. Сдерживающим фактором при этом выступает увеличение температуры шпиндельного узла (ШУ), точность которых на 80% определяет точность станка в целом. Согласно многочисленным исследованиям тепловая погрешность МРС составляет 40-70% в общем балансе погрешностей. Поэтому одной из

основных эксплуатационных характеристик станков наряду с жесткостью, прочностью, виброустойчивостью и износостойкостью является теплостойкость – свойство станка сохранять в установленных пределах выходные параметры точности при различных тепловых воздействиях, которая позволяет повышать быстроходность ШУ без превышения критических температур.

Факторы, влияющие на теплостойкость ШУ, можно условно разделить на 3 группы: конструкционные характеристики, технологические характеристики и условия эксплуатации.

Отечественные и зарубежные ученые, которые изучали тепловые процессы в станках, а также направления их исследований представлены на слайде 3.

Анализ работ, проведенный в главе 1, показал, что повышение быстроходности ШУ рекомендуется за счет существенных конструкторских изменений, например таких как: охлаждение деталей узлов при помощи холодильных машин, увеличение толщины стенки корпуса ШУ, использование металлокерамических подшипников, установка теплоизоляционных прокладок и др. Однако, наряду с конструкторскими факторами, важно учитывать и технологические факторы.

Тепловые потоки в узлах станков имеют весьма сложный характер в связи с большим числом деталей, входящих в их конструкцию. В связи с этим формирование тепловых потоков определяется не только распространением тепла от источников через сплошные детали, но, в значительной мере, через контакты деталей между собой.

Несовершенство контакта на границе раздела твердых тел приводит к возникновению контактного термического сопротивления (КТС). Учет КТС в используемых тепловых моделях дает возможность обоснованно управлять тепловыми потоками в особо точных узлах металлорежущих станков за счет конструкторских и технологических мероприятий, что делает задачу моделирования КТС весьма актуальной.

В связи с этим сформулированы цель и задачи диссертационного исследования:

Целью диссертационной работы является повышение быстроходности шпиндельного узла на основе использования тепловой модели, учитывающей макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей. Для этого были решены следующие задачи:

1. Определены основные факторы, влияющие на КТС в стыках ШУ.
2. Получена регрессионная модель КТС плоского соединения деталей на основе использования контактной псевдосреды.
3. Проведена экспериментальная оценка влияния конструкторско-технологических факторов на КТС плоского стыка.
4. Разработана методика определения теплового состояния ШУ с использованием крупноблочных конечных элементов.

5. Разработаны конструкторско-технологические решения (КТР) по повышению быстроходности ШУ на основе температурного критерия.

Тепловые потоки в МРС формируются при распространении тепла от источников не только через сплошные детали, но и через контакты деталей между собой. Несовершенство контакта на границе раздела твердых тел из-за наличия волнистости, макро- и микроотклонений на контактных поверхностях приводит к возникновению КТС. Многочисленные исследования отечественных и зарубежных ученых установили зависимость процессов формирования КТС от таких факторов, как материал контактирующих тел, среда между поверхностями соприкосновения, температурные условия, усилия прижима поверхностей и др.

Значительное число действующих факторов и различие степени их влияния приводят к выводу, что для их всестороннего учета в тепловой модели в соединении деталей следует расположить псевдослой (псевдосреду) - промежуточный слой, состоящий из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом, обладающего рядом характеристик. Толщина псевдосреды определяется по формуле, представленной на слайде 6. Теоретический анализ показал, что при соблюдении отношения давления в контакте к пределу текучести  $q_a/\sigma_T \leq 0,1$  значение толщины псевдосреды может быть представлено более простой приближенной зависимостью. При этом погрешность не превышает 6,5 %, что вполне допустимо для инженерных расчетов.

Однофакторные эксперименты по оценке влияния характеристик псевдосреды на КТС проводились на конечно-элементной модели контактирования двух квадратных пластин (20 мм x 20 мм) толщиной 1 мм, в зоне контакта которых располагается псевдосреда. Модели псевдосреды с микро- и макроотклонениями, разработанные в программе ELCUT представлены на слайде 7.

Результаты моделирования контакта для различных конечно-элементных моделей при разных коэффициентах теплопроводности, имеющих место в пористой псевдосреде, состоящей из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом, представлены на слайде 8.

На основании проведенных однофакторных экспериментов были отобраны четыре основных фактора, формирующих характеристики псевдосреды:

- значение толщины псевдосреды, определяемое параметром шероховатости  $Ra$ ;
- номинальное давление в контакте  $q_a$ , влияющее на площадь зоны фактического контакта (ЗФК);
- предел текучести контактирующего материала  $\sigma_T$ , который также будет влиять на площадь ЗФК;
- параметр  $l$ , определяющий расположение ЗФК.

Установив влияние отдельных факторов на КТС, на этой же модели был смоделирован многофакторный эксперимент (4-х факторный 2-х уровневый).

Уровни и интервалы варьирования натуральных значений факторов приведены в таблице на слайде 10.

Здесь же представлены зависимость кодированных величин от натуральных значений факторов и уравнение регрессии изменения температуры в зоне контакта для 4-х факторов.

Проверка значимости факторов была проведена с помощью инструмента MS Excel «Регрессия», которая показала, факторы  $x_3$  (предел текучести) и  $x_4$  (расположение ЗФК) не значимы по сравнению с  $x_1$  и  $x_2$ . Уравнение регрессии можно использовать в более простом виде. Полученная регрессионная зависимость использовалась в дальнейшем для задания КТС в расчетных моделях ШУ.

Для подтверждения полученных результатов были проведены натурные эксперименты на стенде, состоящем из пары образцов-параллелепипедов, помещенных в тепловую защиту. Тепловая защита оставляла открытыми на образцах две зоны измерения, где температура измерялась бесконтактным методом с помощью поверенного пирометра DT-8833.

Схемы образцов для проведения экспериментов представлены на слайде 13, которые позволяли исследовать влияние шероховатости поверхности, макроотклонений и количества стыков на тепловые потоки в зоне контакта.

Для оценки влияния наличия в стыке микроотклонений на контактное термическое сопротивление были проведены испытания с образцами, имеющими шероховатость  $Ra=3,2$  мкм и  $0,1$  мкм. Широкий диапазон значений шероховатости выбран в связи с тем, что при повторении опытов наблюдался значительный разброс фиксируемых температур. При незначительных отличиях шероховатости используемых образцов было бы затруднено сравнение полученных результатов. Регрессионные зависимости изменения  $\Delta t$  от номинального давления в стыке представлены на слайде 14. Таким образом, можно сделать вывод, что КТС стыка с увеличением шероховатости увеличивается.

Точки, указанные на графике слайда 14, а также графиках слайдов 15 и 16, являются осредненными значениями из 7 зафиксированных результатов.

Для оценки влияния количества стыков на КТС эксперименты проводились для двух условий: контакт двух образцов – 1 стык и контакт трех образцов – 2 стыка (см. слайд 13). Приведенный на слайде 15 график показал ожидаемое существенное увеличение  $\Delta T$  для двух стыков и подтвердил необходимость учета КТС при оценке распространения тепловых потоков в сборочных станочных единицах.

Для оценки влияния макроотклонений на КТС был выбран образец имеющий на контактной поверхности искусственное макроотклонение.

Пересечение кривых, приведенных на графике, может быть объяснено формированием КТС за счет линий стягивания, которые меняют свои направления с изменением усилия сжатия.

Для того чтобы дополнить и расширить возможности натуральных экспериментов эта задача была решена в среде Workbench Ansys. В процессе расчета получены градиент температуры вдоль выбранного пути по оси Z и график изменения температуры по длине образцов. Коэффициент теплопроводности в зоне стыка задавался таким образом, чтобы температуры на входе и выходе теплового потока при моделировании соответствовали температурам натурального эксперимента. По полученному при моделировании температурному графику можно определять температуры в зоне контакта образцов, что в натуральном эксперименте сложно сделать из-за наличия тепловой защиты.

Для определения теплового состояния ШУ была разработана инженерная методика с использованием крупноблочных конечных элементов (ККЭ), позволяющая проводить конечно-элементный анализ без использования дорогостоящего программного обеспечения. Чтобы использовать данную методику необходимо определить термические сопротивления для нескольких условий распространения теплового потока, представленные на слайде 18.

На основании электротепловой аналогии процесс теплообмена может быть представлен тепловой моделью, имеющей ветви и узлы. Для элемента А ячейка тепловой модели будет представлена в следующем виде. Сопротивления, расположенные последовательно, можно сложить и тогда ячейка тепловой модели примет вид, показанный на слайде 19.

Для каждой координатной плоскости для каждого конечного элемента (КЭ) составляются уравнения равновесия тепловых потоков в ее узлах, расположенных в геометрических центрах КЭ.

Значения термической проводимости между узлами  $i$  и  $j$  по координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  и термическое сопротивление элемента вдоль соответствующей координатной оси определяются по формулам, приведенным на слайде 20. Термические сопротивления были рассчитаны на основе полученной регрессионной модели.

Для подтверждения адекватности предложенной методики численного моделирования и регрессионной зависимости было проведено сравнение результатов натуральных экспериментов и результатов моделирования экспериментального стенда с помощью ККЭ.

Результаты экспериментальных измерений и моделирования по полученной регрессионной зависимости с использованием ККЭ для составного образца с  $R_a=0,1$  мкм показали хорошее качественное и количественное совпадение и подтвердили адекватность предложенных методик.

В станках с ЧПУ широко применяются гильзованные ШУ, конструкция которых, как правило, является осесимметричной. Для таких ШУ разработка тепловой модели может быть значительно упрощена.

Для осесимметричных конструкций в зависимости от диаметральных размеров, тепловая 3D модель может быть приведена к плоской, в виде тонкой пластины постоянной толщины  $H$  или плоскоступенчатой, у которой толщина ККЭ увеличивается по мере удаления от оси симметрии конструкции.

Тепловая модель разбивается на блоки, которые контактируют с сопряженными деталями узла и имеют свободные поверхности (контакт с окружающей средой - воздух). Блоки удобно дополнительно разбить на прямоугольные элементы (показано пунктиром) таким образом, чтобы в углах прямоугольников, нерасположенных на контуре блока, контактировали четыре элемента.

Расчет по предложенной модели сводится к составлению и решению уравнений теплового баланса для узловых точек. Результаты расчета температур для ряда узлов тепловой модели при различных частотах вращения шпинделя приведены на слайде 23.

Типовой конструкцией гильзованного ШУ является шпиндель, в передней и задней опорах которого используются дуплексы из радиально-упорных подшипников. Примером, такой конструкции является ШУ координатно-расточного станка с ЧПУ модели 2440СФ4. Предельная частота вращения шпинделя составляет 4000 об/мин. Класс точности станка С.

Для шпиндельного узла этого станка была разработана тепловая модель по инженерной методике с использованием ККЭ в условиях нескольких источников тепловыделения. Так как ограничивающим параметром температурной картины является температура нагрева наружных колец подшипников, то в качестве тепловой модели ШУ можно рассматривать только гильзу ШУ, в которой установлены наружные кольца подшипников.

Для гильзы ШУ была разработана конечно-элементная модель, состоящая из 36 КЭ. Решение системы из 36 алгебраических уравнений осуществлялось с использованием пакета МАТКАД.

Как говорилось ранее, ограничивающим температурным критерием является избыточная температура нагрева наружных колец подшипников, которая для станков класса точности С составляет  $8^{\circ} \dots 10^{\circ} \text{C}$ .

Расчет температур наружных колец подшипников при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$  по представленной тепловой модели, приведен на графике слайда 26. По графику видно, что для выравнивания температур наружных колец подшипников, нужно перераспределить тепловые потоки. Решение данной задачи заключается в снижении термических сопротивлений на пути теплового потока к наружной поверхности гильзы шпинделя и повышении теплоотдачи с нее в окружающую среду.

Станок мод. 2440СФ4 соответствует температурному критерию. Однако, практически не имеется резерва для увеличения быстроходности без внесения конструкторско-технологических изменений.

Конструкторско-технологические решения, позволяющие достичь положительного результата без существенных конструкторских изменений,

могут быть связаны с увеличением площади наружных теплоотдающих поверхностей и со снижением контактных термических сопротивлений.

С целью увеличения площади наружных теплоотдающих поверхностей, был проведен расчет гильзы ШУ с кольцевыми канавками, нарезанными на наружной цилиндрической поверхности, свободной от посадки гильзы в корпус двух видов: квадратного профиля и прямоугольного углубленного профиля. Это позволяет увеличить площадь, участвующую в конвекционном обмене, у КЭ № 21, 23, 25, 28 в 2 и 3 раза соответственно. Результаты расчета приведены в таблице слайда 28.

Влияние подбора подшипников за счет обеспечения среднего и максимального натягов в посадках колец на температуры подшипников с целью снижения контактных термических сопротивлений показано на графике слайда 29. Эффективность повышения качества контактирующих поверхностей в ШУ приведена в таблице слайда 29.

Результат комплексной реализации рассмотренных конструкторско-технологических решений представлен на слайде 30 и позволяет увеличить частоту вращения шпинделя с 4000 об/мин (у базового варианта) до 5000 об/мин (максимальная быстроходность подшипников 2-46115 при работе с пластичной смазкой) и до 6300 об/мин (максимальная быстроходность подшипников 2-46115 при работе с жидкой смазкой). Значения температур наружных колец подшипников при этом не превышают значений температурного критерия в 28...30°C.

Результаты диссертационной работы внедрены на ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара) в виде инженерной методики построения температурных полей шпиндельного узла с использованием ККЭ, а также использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в СамГТУ.

В результате проделанной работы были сделаны следующие выводы, приведенные на слайдах 31 и 32. Спасибо за внимание.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо. Пожалуйста, вопросы к соискателю. Д-р техн. наук Ковальногов В.Н.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

Если вернуться к названию диссертации - 1 слайд, то поясните, какова причинно-следственная связь между моделированием теплового состояния и повышением быстроходности шпиндельного узла.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

От теплового состояния шпиндельного узла, от того, на сколько он будет соответствовать температурному критерию, для станка данного класса точности будет зависеть его быстроходность. Можно не превышая критических температур увеличить быстроходность.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

За счет чего увеличивается быстроходность, какие-то мероприятия нужно проводить?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Мы внесли конструкторско-технологические изменения: нарезали на свободной поверхности гильзы кольцевые канавки, которые увеличили наружную теплоотдающую площадь, улучшили качество контактирующих поверхностей ШУ на 1 класс, и рассмотрели влияние среднего и максимального натяга в кольцах подшипниках на температуры наружных колец подшипников. Все это вместе снижает термическое сопротивление и повышает быстроходность.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

Откуда взялась терминология «псевдосреда», в переводе - это мнимая, ложная среда. Что имеется в виду?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Псевдосреда - это пространство в зоне контакта, состоящее из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или смазкой. Таким образом, получается мнимая среда, качество которой зависит от шероховатости, от макроотклонений.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

Совершенно реальная среда, почему «псевдосреда», эта терминология, откуда-то взята или придумана?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

В литературе так называют контакт между поверхностями.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

Больше нет вопросов.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Пожалуйста, д-р техн. наук Киселев Е.С.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Я не присутствовал ни на одном предварительном заседании, и может быть, эти вопросы уже задавались. Что понимается под быстроходностью, термин есть в заголовке и откуда он появился?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Быстроходность – это одна из характеристик станков, принято оценивать произведением  $d \cdot n$ , где  $d$  – диаметр передней шейки шпинделя, а  $n$  – наибольшая частота вращения шпинделя.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Обороты в минуту?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Быстроходность оценивается мм об/мин.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Почему тогда используете быстроходность, а не частоту вращения или угловую скорость?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Использование параметра быстроходности, а не частоты вращения, позволяет распространить полученные результаты на станки разных типоразмеров.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Ну и использовали бы как частоту вращения, а Вы быстроходность здесь использовали, какой-то оригинальный метод. На 3 слайде было упомянуто много ученых, которые занимались этим вопросом. Почему нет упоминания о Хусаинове Альберте Шамильевиче? Он защищал у нас в Совете докторскую диссертацию. Он использовал термин «коэффициент термического сопротивления» и рассматривал вопрос шлифования тонких плоскостей на металлической подложке. Там всесторонне рассматривался момент перехода температуры от ножа или тонкой пластины на подложке. Фактически, это тоже самое. Вы же ничего не упомянули об этом.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

К сожалению, я не видела этой работы.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Очень плохо. Там в числе прочего учитывались разные материалы и у Вас разные: подшипник изготавливается из одного материала, шпиндель из другого. У них коэффициент термического сопротивления разный. А Вы его даже не упоминали. Как учитывалось, что подшипники и шпиндель изготовлены из разного материала? Вот у Вас подшипники из металлокерамики?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Подшипники из металлокерамики в нашем станке не используются, это было приведено в качестве примера конструкторских решений повышения быстроходности ШУ.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

У Вас используется достаточно старый станок, частота вращения 4000 об/мин, а в современных металлорежущих станках до 70 000, уж 40-25 тыс. то спокойно. Вы за счет Ваших разработок, на сколько, смогли увеличить число оборотов шпинделя? У Вас хотя бы теоретически насколько повысилась быстроходность? Как менялись числа оборотов, приведенные в выводах?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

В натуральных экспериментах число оборотов не менялось, это численное моделирование.

**Д-р техн. наук, профессор Киселев Е.С.**

Металлокерамические подшипники у Вас в Самаре производятся?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Нет, не делают.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Д-р техн. наук Лобанов Д.В., пожалуйста, вопросы.

**Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д.В.**

Высокоскоростное оборудование работает на более высокой частоте. Исследовалось ли в Вашей работе как поведет себя система при сверхскоростях, может быть это будет уже не линейная система как у Вас?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Нет, не исследовалось. Такая задача не ставилась.

**Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д.В.:**

Какова величина сходимости в Ваших модельных и эмпирических результатах?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Оценивали погрешность измерения - это 3-4% по температурам.

**Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д.В.:**

У Вас, то  $t$  маленькое, то большое, это разница температуры или температура?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

$\Delta T$  это изменение температуры.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, д-р техн. наук Клячкин В.Н. Ваши вопросы.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

У меня пара вопросов по математическим методам, которыми Вы пользовались. Первое это регрессия. Как объяснить, почему индивидуальные исследования показали, что 4 фактора значимы, а когда перешли на общую модель, оказалось, что 2 из них незначимы?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Были сравнены значения факторов с  $t_{кр}$  по распределению Стьюдента и получилось, что 1 и 2 фактор больше, чем критическое значение, а 2 других меньше, значит незначимы.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

Чисто математически два фактора влияют.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Когда провели первый численный эксперимент, то отобрали 4 значимых фактора. Но, когда уточнили методами математической статистики, получилось 2.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

Как оценить значимость модели?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

По расчетному значению коэффициента детерминации  $R^2$ , которое показывает долю вариации изменения температуры в зоне контакта  $\Delta T$ . Значение  $R^2=0,827$  показывает, что примерно 83% вариации  $\Delta T$  определяется значениями факторов  $X_1 - X_4$  на основании полученной множественной линейной функции регрессии. Оценена достоверность самой величины  $R^2$ , близкое к единице значение свидетельствует о достоверности полученного уравнения регрессии.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

$R^2$  не очень хороший, это значит, что Ваша модель только на 82% верно описывает процесс.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Было проведено также сравнение остатков модели на симметричность, которое приведено в диссертации.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

Может быть, 4-х факторный эксперимент слабоват, чтобы учесть эти факторы? Может быть, нужно было оценить парное влияние коэффициентов? Раз физический эксперимент показал, что 4 значимых фактора, то они должны были себя проявить. Вопрос по КЭ модели. У Вас несколько КЭМ. Почему в КЭМ были взяты крупные прямоугольники, хотя базовые элементы треугольные? Где гарантия, что это точный расчет?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Мы посчитали, что важность имеет не форма и размер ККЭ, а то, что в углах прямоугольников должно находиться 4 элемента, чтобы удобно было составлять уравнения теплового баланса и считать термические сопротивления для контакта с окружающей средой, контакта с соседними деталями и внутри одной детали.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

Крупные треугольные элементы возможно дали бы более точную картину и в СамГТУ, конечно, есть программные средства для такого расчета. Для сравнения можно было бы сделать расчет МКЭ.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Расчет не делался в Ansys, так как контактирующие поверхности и та среда между ними - это разномасштабные модели, сетка КЭ в стыке будет настолько большой, что расчет такой модели невозможен. Мы же учитывали как раз стыки и сопротивления в них.

**Д-р техн. наук, профессор Клячкин В.Н.**

У меня больше нет вопросов.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, д-р техн. наук Унянин А.Н.

**Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.**

Первый вопрос по 6 слайду. Зависимость для определения толщины псевдосреды кем получена?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Зависимость взята у учеников Рыжова Э.В. – Хохлова В.М. и Петракова Д.И.

**Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.**

Второй вопрос, давление, чтобы обеспечить натяг, посчитано для упругой деформации или вызывает пластическую деформацию?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Учитывается только упругая деформация.

**Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.**

Вопрос по 9 слайду по поводу факторов, которые влияют на термическое сопротивление. Толщина псевдосреды определяется параметром шероховатости, а как же другие факторы: давление, предел текучести?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Мы приняли, что при отношении давления в контакте к пределу текучести меньше или равного 0,1 можно использовать более простую приближенную зависимость, когда толщина псевдосреды зависит только от шероховатости.

**Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.**

Уравнения теплового баланса были рассчитаны, по какой программе, по своей?

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Система уравнений была решена в пакете МАТКАД, которая позволяет решать системы до 50 уравнений.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Есть ли еще вопросы? Больше нет вопросов? Вопросы закончились? Садитесь, пожалуйста. Так, технический перерыв будем делать? Все отказываются от технического перерыва. Продолжаем работу. Слово предоставляется научному руководителю доктору технических наук, профессору Денисенко А.Ф.

**Д-р техн. наук, профессор Денисенко А. Ф.**

Любовь Юрьевна, закончила Куйбышевский политехнический институт, получила квалификацию инженер-механик, в настоящее время трудится в нашем Вузе, весной 2023 года закончила очную аспирантуру по направлению 15.06.01 – Машиностроение по профилю «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». Актуальность представленной работы подтверждается тем, что в настоящее время очень мало работ, посвященных совершенствованию станкостроительного оборудования, а востребованность в этой тематике очень велика. Не ставилась цель сделать совершенно универсальные методики, позволившие рассматривать сверхбыстроходное оборудование. Была поставлена задача – каким образом, применяя минимальные изменения в имеющееся оборудование, которые очень часто производятся на этапе модернизации старого, но еще работоспособного оборудования, решить задачи увеличения максимальной частоты вращения в пределах того, что позволяет температурный критерий, а именно температура наружных колец подшипников. Были поставлены задачи, с которыми Любовь Юрьевна успешно справилась. Любовь Юрьевна показала себя за время обучения в аспирантуре и подготовке диссертационной работы творческим научным работником, целеустремленным исследователем. Было много времени посвящено натурным экспериментам, которые при работе с температурами являются очень долговременными и требуют больших временных затрат. Освоила методы численного моделирования, использовала методы

планирования эксперимента, которые применила достаточно корректно. Полученные результаты являются весьма обоснованными, так как подтверждаются натурными экспериментами, которые совпадают с результатами других исследователей. За последние пять лет, работая в должности старшего преподавателя, являлась заместителем заведующего кафедрой по учебной работе, что не позволило выйти на защиту раньше. Одно из хороших качеств Любовь Юрьевна, что она адекватно реагирует на замечания, которые были сделаны. В коллективе она пользуется уважением, общительна, коммуникабельна. Все это говорит о том, что Любовь Юрьевна сформированный научный работник, а ее работа удовлетворяет всем требованиям, которые предъявляются к работам на соискание ученой степени кандидата технических наук.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, садитесь. Слово предоставляется ученому секретарю диссертационного совета д-ру техн. наук Веткасову Н.И. для оглашения заключения организации, где выполнялась работа и отзыва ведущей организации.

**Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Веткасов Н.И.**

Диссертация «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет». Отмечается, что Любовь Юрьевна в 1985 году с отличием окончила Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева по специальности «Машины и технологии литейного производства» и получила квалификацию инженер-механик. В период подготовки диссертации и по настоящее время Любовь Юрьевна работает в ФГБОУ ВО СамГТУ. В 2023 году окончила очную аспирантуру в ФГБОУ ВО СамГТУ по направлению подготовки 15.06.01. – Машиностроение, профиль - «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)». Справка о сроках обучения в аспирантуре и сдаче кандидатских экзаменов выдана 31.08.23.

Научный руководитель – Денисенко Александр Федорович, профессор, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Самарского государственного технического университета».

По итогам обсуждения диссертационной работы принято следующее заключение, в котором отмечается актуальность работы – это повышение быстроходности шпиндельных узлов за счет конструкторских и технологических решений на ранних этапах проектирования и производства. Отмечается степень достоверности результатов проведенных исследований: корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез. Научная новизна полученных в диссертации результатов определяется рядом научных положений и выводов: разработке

и обосновании моделей теплопроводности соединений деталей металлорежущих станков; выявлении степени влияния конструкторско-технологических факторов на контактные термические сопротивления; установлении закономерностей формирования температурных полей шпиндельных узлов.

К практическим результатам диссертационной работы можно отнести: разработку инженерной методики определения теплового состояния деталей ШУ; установление регрессионной зависимости для определения контактного термического сопротивления. Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению в виде методики построения температурных полей с использованием ККЭ шпиндельного узла на ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара), а также использованы при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в СамГТУ.

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на 6-ти международных и всероссийских научно-технических конференциях. Материалы диссертации отражены в 14 печатных трудах. Приводится перечень этих работ.

В заключении отмечается соответствие паспорту научной специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)». Диссертация соответствует пунктам №1, №4, №6 области исследования паспорта специальности 2.5.5.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты».

Присутствовали на заседании 11 сотрудников СамГТУ, в том числе 3 доктора технических наук. Результаты голосования: «за» - 11 человек, «против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол заседания № 1 от «31» августа 2023 г.

Заключение подписал Гришин Р.Г. канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты» ФГБОУ ВО «СамГТУ». Заключение утверждено первым проректором, проректором по научной работе ФГБОУ ВО «СамГТУ» Ненашевым М.В.

Имеется отзыв ведущей организации ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» на диссертацию Подкругляк Л.Ю.

В отзыве отмечается актуальность темы диссертации. Совершенствованием конструкций современных металлорежущих станков является повышение их быстроходности, обеспечивающей рост производительности обработки. Точность станка в целом на 80% определяется точностью шпиндельного узла. Сдерживающим фактором при этом выступает увеличение температуры шпиндельных узлов. Учет температурного критерия при проектировании станков является одним из направлений их совершенствования. Делается вывод о том, что повышение быстроходности ШУ на основе использования расчетных моделей, адекватно

отражающих особенности реальных конструкций, является важной и актуальной задачей.

Диссертация Подкругляк Любовь Юрьевны имеет существенную научную значимость полученных автором диссертации результатов и рекомендации по их применению: предложенная модель и разработанная методика численного моделирования с применением ККЭ использована, при установлении закономерностей формирования температурных полей шпиндельных узлов металлорежущих станков.

Полученные автором результаты имеют значимость для развития научной специальности 2.5.5. Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке и обосновании моделей теплопроводности соединений деталей металлорежущих станков на основе использования псевдослоя. Практическая значимость результатов работы состоит в разработке инженерной методики определения теплового состояния деталей ШУ. Разработанные тепловые модели и инженерные методики позволяют на ранней стадии проектирования станков сформулировать конструкторско-технологические решения для повышения быстроходности ШУ металлорежущих станков.

Полученные результаты позволяют рекомендовать их к внедрению: разработанные тепловые модели и инженерные методики могут найти применение в системах инженерного анализа температурного поля автономных шпиндельных узлов; разработанная методика численного моделирования с применением ККЭ может быть использована при построении температурных полей крупногабаритных узлов МРС; результаты диссертационной работы рекомендуется использовать в проектной деятельности на предприятиях, ориентированных на изготовление современных металлорежущих станков, и в учебном процессе образовательных учреждений.

Приводится оценка содержания диссертации и автореферата. Диссертация состоит из 131 страницы, содержащих 68 рисунков, 30 таблиц, 42 формулы, и включает введение, пять глав, список литературы из 204 наименований. В каждой главе представлены результаты решения поставленных задач.

Во введении автором обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, практическая значимость работы, указаны методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов.

В первой главе рассмотрены конструкции современных шпиндельных узлов, конструкторско-технологические требования к их элементам и современное состояние вопроса обеспечения теплостойкости ШУ. Во второй главе решается задача по разработке математической модели формирования контактного термического сопротивления (КТС), выделены существенные факторы, влияющие на КТС. Получена регрессионная зависимость изменения температуры в зоне контакта для разных параметров

шероховатости. Третья глава посвящена разработке стенда для оценки влияния качества контактирующих поверхностей и давления в стыке на прохождение теплового потока через плоское соединение. В четвёртой главе описывается разработанная инженерная методика определения теплового состояния сборочных единиц станков с использованием ККЭ, позволяющая проводить конечно-элементный анализ без использования дорогостоящего программного обеспечения. Данная методика дает возможность определить температуру в любой узловой точке тепловой модели. В пятой главе разработана тепловая модель шпиндельного узла станка мод. 2440СФ4 в условиях нескольких источников тепловыделения, на основании которой установлены закономерности формирования температурных полей и предложены конструкторско-технологические решения, связанные с увеличением площади наружных теплоотдающих поверхностей, и со снижением КТС путем увеличения давлений в соединениях. По каждой главе диссертации сделаны соответствующие выводы. Объёмы каждой главы и всей диссертации в целом соответствует установленным требованиям. В заключении представлены основные результаты, полученные автором в ходе диссертационного исследования.

Сформулированы замечания по диссертационной работе:

1. Регрессионные зависимости натуральных экспериментов изменения температуры в зоне контакта деталей подтверждены моделированием методом конечных элементов. Однако, не понятно, как при моделировании учитывалась шероховатость контактирующих поверхностей. 2. В работе нет информации о том, как выбираются размеры ККЭ в предложенной инженерной методике. 3. В работе приведены результаты теплового анализа шпиндельного узла координатно-расточного станка мод. 2440СФ4. Автором не поясняется, как эти результаты можно распространить на другие типы станков. 4. В работе приведено упоминание о системе Ansys, однако в недостаточной степени автором аргументированы преимущества предлагаемой модели от моделей, реализуемых в современных профессиональных системах: AnsysMechanical, Siemens NX, SolidWorksSimulation, COMSOL Multiphysics, КОМПАС 3D (APM FEM) и др. 5. На рисунке 14 автореферата приведена достаточно простая расчетная модель гильзы шпиндельного узла, но ничего не сказано о существующих ограничениях по размерности и сложности предлагаемой тепловой модели, а также её программной реализации. 6. Автор выбрал в качестве инструментальной среды для разработки программного средства Mathcad, которая, как и упоминаемая автором в работе система Ansys, не является отечественной системой. В связи с этим возникает вопрос о возможности использования других интегрированных сред разработки для более эффективной разработки собственного программного средства. Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают её научной и практической ценности.

Приводится заключение по диссертационной работе.

Диссертация Подкругляк Любовь Юрьевны «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности шпиндельных узлов МРС, имеющие существенное значение для развития станкостроения. По результатам работы над диссертацией автором опубликовано четырнадцать печатных работ, в том числе четыре статьи в журналах из Перечня, рекомендованного ВАК России. Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Диссертационная работа по актуальности темы, новизне научных положений и практической значимости, объёму выполненных исследований соответствует критериям, изложенным в пунктах 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук.

Автор работы, Подкругляк Любовь Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Технологии машиностроения, обрабатывающих станков и комплексов» Аэрокосмического института Оренбургского государственного университета, протокол № 5 от «28» ноября 2023 года.

Отзыв подписали заведующий кафедрой «Технологии машиностроения, обрабатывающих станков и комплексов», д-р техн. наук, профессор А.Н. Поляков и доцент кафедры «Технология машиностроения, обрабатывающие станки и комплексы», канд. техн. наук, доцент С.В. Каменев. Отзыв утвержден проректором по научной работе Оренбургского государственного университета, д-ром физ.-мат. наук, профессором Летутой Сергеем Николаевичем.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Николай Иванович. К Николаю Ивановичу есть вопросы? Нет. Тогда продолжаем. На автореферат диссертации поступило 5 отзывов, все они положительные. Есть предложение заслушать обзор или заслушать их полный текст. Прошу проголосовать за обзор. Единогласно. Слово для обзора отзывов дается Веткасову Н.И.

**Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Веткасов Н.И.**

Уважаемые коллеги! Обзор отзывов ученым секретарем предлагается не проводить. Учитывая, что всем роздан раздаточный материал, в котором приведен перечень замечаний на автореферат диссертации, а также ответы на эти замечания ограничимся ответами соискателя на эти замечания.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Члены диссертационного совета согласны? **Согласны.** Слово для ответов по замечаниям в отзыве ведущей организации и отзывам на автореферат предоставляется соискателю.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Ответ на первое замечание ведущей организации:

Поскольку тела контактирующих деталей и шероховатость поверхности являются разномасштабными моделями, то при использовании классического метода конечных элементов количество КЭ в такой модели будет настолько большим, что сделает расчет по этой модели невозможным. В нашей модели шероховатость учитывалась только через коэффициент теплопроводности в зоне стыка, который задавался таким образом, чтобы температура на входе и выходе теплового потока при моделировании соответствовала температурам натуральных экспериментов.

Ответ на второе замечание ведущей организации:

Размеры ККЭ для плоской модели в предложенной инженерной методике могут быть любыми, и определяться следующими условиями: контур плоской модели должен быть заполнен прямоугольниками таким образом, чтобы в углах прямоугольников не расположенных на свободном контуре контактировали 4 элемента. Аналогичные условия должны обеспечиваться и для 3D тепловой модели, только число контактирующих элементов в их углах должно быть равно 8.

Ответ на третье замечание ведущей организации:

Так как координатно-расточной станок мод. 2440СФ4 имеет гильзованную конструкцию шпиндельного узла, то результаты теплового анализа могут быть распространены на все осесимметричные шпиндельные узлы прецизионных станков.

Ответ на четвертое замечание ведущей организации:

Система Ansys выбрана в связи с тем, что это продукт мирового уровня, многократно доказавший свои возможности на различных тестовых задачах.

Ответ на пятое замечание ведущей организации:

Расчетная тепловая модель гильзы шпиндельного узла получена с использованием предложенной инженерной методике с применением ККЭ, которая подробно описана в тексте диссертации. Программная реализация предлагаемой модели не требует специальных программных продуктов: могут быть использованы любые пакеты, позволяющие решать системы алгебраических уравнений. В нашей работе с этой целью использовался пакет Mathcad, позволяющий получать решения систем из 50-ти уравнений.

Ответ на шестое замечание ведущей организации:

Отечественных программ аналогичного уровня не существует. Мы не разрабатывали в работе программное средство, а использовали пакет Mathcad для решения математической модели, представляющей из себя систему уравнений.

По ответам на замечания в отзывах на автореферат диссертации.

Замечания, содержащиеся в отзывах на автореферат, были объединены в группы в зависимости от характера ответа на них.

Первая группа замечаний для ответа, на которые исчерпывающая информация есть в диссертации. Это второе замечание д-ра техн. наук Ярьсько С. И., третье и четвертое замечания канд. техн. наук Хлопкова Е. А. Вторая группа замечаний — это пожелания, с которыми я согласна, в нее входят: третье замечание канд. техн. наук, доцента Ильиных В.А.

Третья группа замечаний — это критические замечания, с которыми согласна, к ним относятся: первое замечание д-ра техн. наук, профессора Скрыбина В.А.; четвертое замечание д-ра техн. наук Ярьсько С.И.

Четвертая группа замечаний — это замечания, на которые хотела бы дать пояснения, к ним относятся:

- замечания д-ра техн. наук Ярьсько С.И.:

1. Возможность распространения результатов, полученных для плоского стыка на цилиндрические соединения, может быть обоснована незначительными толщинами КЭ в плоских и плоскоступенчатых моделях, используемых в предлагаемой инженерной методике.

3. В экспериментах не рассматривался образец с несимметричным расположением макроотклонения, в связи с тем, что при закреплении образца и приложении сжимающего усилия такой образец будет вести себя нестабильно, т.е. поворачиваться в пространстве. В результате могут быть получены некорректные значения температур.

- замечания канд. техн. наук, доцента Ильиных В.А.:

1. При применении инновационной конструкции гильзы с канавками разного профиля в ШУ не меняется ни наружный диаметр гильзы, свободный от посадки гильзы в корпус, ни внутренний. Поэтому посадки в соединениях не будут иными. Посадки указаны на рис. 13 стр. 12 автореферата.

2. Макроотклонение с искусственным отклонением формы в виде лунки максимальной глубиной 0,1 мм, которое применяется в натуральных экспериментах можно отнести к следующему виду отклонения формы: отклонение от плоскостности - вогнутость.

- замечания д-ра техн. наук, профессора Скрыбина В.А.:

2. Разработка расчетной схемы перед началом теоретических исследований не представлялась возможным, т.к. именно исследования КТС привело к необходимости использования в расчетной модели псевдослоя. В связи с этим расчетная модель ШУ была представлена только в 5 главе.

3. Тепловые потоки в зонах трения не определялись, т.к. в ШУ распространение тепловых потоков осуществляется через детали и неподвижные соединения.

- замечания канд. техн. наук Хлопкова Е. А.:

1. Толщина пластин при проведении однофакторных экспериментов задана равной 1 мм, т.к. в дальнейшем использовалась плоская тепловая модель ШУ в виде тонкой пластины постоянной толщины  $H=1$  мм или

плоскоступенчатая, у которой минимальная толщина конечных элементов тоже 1 мм по центру зон тепловыделения.

2. Диапазон давлений от 2 до 40 МПа использовался только для проведения натуральных экспериментов. Диапазон давлений, используемый для численного моделирования, составляет  $q_a = (1...175) \cdot 10^6$  Н/м<sup>2</sup>, что перекрывает значения в опорных узлах ШУ станка, предельные значения которых приведены в тексте диссертации в табл. 5.5 на стр. 99 и на стр. 101.

5. Вопрос о том как изменится погрешность обработки при увеличении частоты вращения шпинделя не нашел отражения в материалах диссертации, так как это не являлось задачей исследований.

- замечания д-ра техн. наук, профессора Леонова С.Л. и д-ра техн. наук, профессора Иконникова А.М.:

1. Для построения регрессионной зависимости методом конечных элементов (глава 2) использована плоская модель контакта пластин, т.к. в дальнейшем использовалась плоская тепловая модель ШУ в виде тонкой пластины постоянной толщины Н=1 мм или плоскоступенчатая, у которой минимальная толщина конечных элементов тоже 1 мм по центру зон тепловыделения.

2. При построении регрессионной модели используется пакет ELCUT т.к. нужно было определить основные факторы, формирующие характеристики псевдосреды, а при решении задачи прохождения теплового потока через плоский стык в главе 3 – пакет Ansys, т.к. необходимо было смоделировать натуральный экспериментальный стенд и зону контакта образцов.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо. Слово для отзыва представляется официальному оппоненту д-ру техн. наук Кузнецову Александру Павловичу, который присутствует в дистанционном режиме.

**Официальный оппонент - д-р техн. наук, Кузнецов А.П.**

Добрый день, уважаемый председатель и члены диссертационного совета! Я остановлюсь на основных моментах, и не буду говорить о том, что уже прозвучало.

В последние годы в обрабатывающей промышленности возросли требования к точности, прецизионности и повышению производительности станков и обрабатываемых на них деталей. Так, для металлорежущих станков нормальной и повышенной точности достижимая точность обработки в настоящее время находится в диапазоне 1-5 мкм и, если указанная тенденция сохранится, то в ближайшие 10-15 лет может быть достигнут стабильный диапазон точностей в пределах 0,1-1 мкм, что естественно потребует значительных усилий по исследованию процессов и механизмов достижения и обеспечения точности во всем спектре проблем, что связано с данной тематикой.

Можно выделить несколько этапов в исследовании тепловых процессов: период с 1950 гг. по настоящее время – выполнен большой объем

работ по изучению тепловых процессов и эффектов, происходящих в металлорежущих станках при их функционировании. Проведенные исследования показателей и характеристик точности и производительности станков дают основания считать, что в балансе точности станков доля температурных погрешностей в период 1950 - 2020 гг. изменилась с 20-30% до 70% и это определяется абсолютной величиной достижимой точности станка. В период 1980-2020гг. сформировались виды и формы методов коррекции и компенсации теплового поведения формообразующих элементов станков. В качестве математических методов описания тепловых моделей чаще всего применялись методы расчетно-экспериментальные, стационарной теплопроводности, МКЭ, а нестационарные процессы или не описывались или определялись по простейшим моделям теплового баланса без всего реального многообразия граничных условий при определении температур.

Развитие технологий высокоскоростного и высокопроизводительного резания обусловило необходимость проведения как их фундаментальных исследований, так и различных исследований реальных процессов, которые оценивали влияние различных параметров - скорость, глубина, подача, свойства обрабатываемого материала, свойства станка и т.п. на характеристики станков, такие как мощность, энергия, температура, силы, скорость, вибрации и др.

Поэтому, повышение быстроходности шпиндельных узлов современных металлорежущих станков связано с объективной необходимостью роста производительности обработки. Но вместе с быстроходностью растут и тепловые деформации за счет увеличения температуры шпиндельных узлов. Тепловые потоки и граничные тепловые связи в узлах станков имеют сложный характер, а их количественная оценка имеет первостепенное значение для инженерной практики и во многих случаях моделирования не имеют достаточно достоверных и объективно обусловленных значений. Поэтому, исходя из вышесказанного, тема диссертационной работы Подкругляк Любови Юрьевны, направленной на повышение быстроходности шпиндельного узла на основе использования тепловой модели, учитывающей макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей, является актуальной в области станко- и машиностроения и не вызывает сомнений.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается корректным использованием теоретических, расчетных и экспериментальных методов исследования. Выбранный диссертантом путь проведения исследований решает поставленные задачи с достаточной полнотой. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, следует также из анализа содержания научно-квалификационного труда.

Рецензируемая диссертация Подкругляк Любови Юрьевны состоит из введения и пяти глав: в каждой главе имеются пункты в соответствии с названием. Список использованных источников включает 204 источника: 177 это работы отечественных исследователей, а 27 – работы иностранных авторов, причем диапазон и глубина соответствует периоду с 1962 по 2022гг., что говорит о достоверности и знании проблематики. Приведены акты внедрений на станкостроительном заводе «Стан-Самара» и в учебном процессе ФГБОУ ВО СамГТУ.

Названия и объем основных разделов диссертации свидетельствуют о научной глубине проведенной соискателем работе, как в теоретической, так и экспериментальной области исследований. Выдвинутые автором научные положения и выводы, достаточно обоснованы и базируются на использовании известных положений современной науки, фундаментальных положениях технологии машиностроения, теории трения и износа машин, топологии поверхностей деталей машин, положений методов расчёта и проектирования станков, деталей и шпиндельных узлов, теории математического моделирования, численных и аналитических методов, методов математической статистики.

Достоверность результатов, представленных в диссертации, обеспечивается адекватностью исходных положений, реализацией поставленных в диссертации цели и задач исследования, сопоставлением и согласованием теоретических и расчетных данных с результатами экспериментов, а экспериментальные исследования выполнены корректно с использованием соответствующих современных средств измерения и контроля, исследуемых величин. Широкое использование в экспериментальных исследованиях теории планирования экспериментов и обработка результатов методами математической статистики являются основанием для вывода о достаточной степени достоверности полученных результатов.

Полученные автором работы результаты не противоречат данным ранее проведенных исследований.

Научная новизна диссертационной работы. Значимыми результатами и научной новизной диссертационной работы Подкругляк Любови Юрьевны являются: разработка и обоснование модели теплопроводности соединений деталей на основе использования введенного понятия «псевдослоя» и обоснования выбора его параметров и характеристик, которые адекватно учитывают состояние и условия контактирующих поверхностей деталей; эмпирические зависимости изменения температуры в зоне контакта от толщины псевдослоя и номинального давления в контакте; обоснование значимости конструкторско-технологических факторов и степени их влияния на контактные термические сопротивления.

Это в совокупности является научной базой для установления закономерностей формирования температурных полей шпиндельных узлов, в том числе, и при наличии нескольких источников тепловыделения, что

позволило достичь цели, сформулированной в работе. Сказанное позволяет считать, что диссертация выполнена на высоком научном уровне.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в обосновании, принципе построения и математическом анализе модели контактной теплопроводности соединений деталей металлорежущих станков на основе понятия «псевдослоя», характеристики которого учитывают макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей, а также в выявлении степени влияния конструкторско-технологических факторов на контактное термическое сопротивление. Очевидный практический интерес представляет разработанная инженерная методика определения теплового состояния шпиндельных узлов на основе ККЭ. Полученная регрессионная зависимость для определения контактного термического сопротивления позволяет оценивать его и применять на практике при проектировании путем обоснованного задания основных проектных параметров. Практическую ценность также представляют конструкторско-технологические решения, позволяющие существенно повысить быстроходность шпиндельного узла станка модели 2440 и их аналогов. Основные результаты диссертационной работы изложены и опубликованы в 14 работах, в том числе 4 научные статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных и 7 статей в других изданиях и материалах конференций. Диссертация прошла апробация на 7 международных и всероссийских конференциях. Приведенные в библиографическом списке работы автора, а также перечень научно-технических конференций, на которых докладывались и обсуждались основные результаты, дают основание считать, что диссертационная работа Подкругляк Любови Юрьевны прошла достаточную апробацию.

Автореферат в полном объеме отражает содержание диссертационной работы и позволяет ознакомиться со всеми основными результатами, полученными автором, а также выводами и рекомендациями, вытекающими из проведенных исследований.

Оформление материалов диссертации. Работа написана, в основном, технически грамотным языком, хотя иногда встречаются трудно воспринимаемые предложения. Автор, в основном, грамотно и обосновано применяет принятую терминологию. Тексты автореферата и диссертации оформлены в соответствии с рекомендациями стандарта ГОСТ Р 7.0.11-2011 и рекомендациями ВАК Минобрнауки РФ. Диссертация имеет целостную структуру и единый стиль изложения материала. Логика изложения и аргументация позволила всесторонне раскрыть как рассматриваемые задачи, так целостно изложить решение научной и технической проблемы. Диссертация снабжена достаточным и необходимым количеством иллюстративного материала, ссылками на авторов и источники, откуда заимствованы отдельные результаты, корректны и соответствуют

современному состоянию вопроса. Рисунки выполнены, как правило, качественно и читабельно. Выдвинутые автором научные положения и выводы достаточно обоснованы с использованием известных современных положений науки и инженерной практики, позволяют оценить результативность выполненных исследований, а представленные экспериментальные исследования выполнены корректно с использованием соответствующих современных средств измерения и контроля. Общие выводы по работе включают 7 пунктов, являются достоверными и базируются на материалах исследований, представленных в диссертационной работе. Материалы приложений содержат необходимую информацию и документацию.

Соответствие паспорту научной специальности. Содержание, выполненных исследований, соответствуют паспорту научной специальности 2.5.5: направление исследований №1 и №5.

Недостатки и замечания по диссертационной работе:

1. При рассмотрении и анализе состояния вопроса (глава 1) недостаточно внимания уделено тенденциям развития конструктивного совершенства шпиндельных узлов и особенно применению новых материалов, например углепластиков, применение которых также имеет целью повышение быстроходности, а также особенностям шпиндельных узлов для высоко- и сверхскоростной обработки.

2. При планировании эксперимента (глава 2) с целью получения регрессионной зависимости снижения температуры в зоне плоского стыка не обосновано принятие допущения о значении толщины «псевдослоя», зависящим только от параметра шероховатости  $R_a$ .

3. Не ясно, какая необходимость (глава 2) в проведения исследований и моделирования методом конечных элементов экспериментальной установки, а также аналогичные вопросы о моделировании в среде ELCUT.

4. В тексте диссертации необходимо было бы разместить фотографии реального станда, на котором проводились экспериментальные исследования. Кроме этого далеко не все рисунки читабельны и информативны, например, рис. 2.3, 2.7, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8 и др., имеются одинаковые обозначения разных величин, т.е.  $q$  и тепловой поток и удельное давление.

5. В работе не указано, какая смазка используется в шпиндельном узле станка 24К40СФ4 и как вид смазки может быть учтен или учитывается в предлагаемой методике.

6. В главе 5 на стр.104 указано «температуры наружных колец подшипников при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$ , рассчитанные по представленной в разделе 5.1.2 плоскоступенчатой модели», хотя на стр. 96 рис. 5.6 данного раздела указано, что модель плоская. Непонятно, какая на самом деле модель должна применяться для расчетов?

7. В диссертации в первой задаче используется понятие «существенные факторы», а в тексте автореферата «основные факторы». Какое понятие

верное? В целом приведенные замечания не снижают научной новизны, практической ценности полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

Общая характеристика диссертационной работы. Диссертационная работа Подкругляк Л.Ю. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности шпиндельных узлов МРС, имеющие существенное значение для развития станкостроения. Тем самым можно констатировать, что диссертация соответствует критериям пункта 9 раздела II Положения о порядке присуждения ученых степеней.

Тема, цель, задачи и содержание диссертации соответствуют заявленной специальности 2.5.5 - «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Работа выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне. Методики и средства выполненных исследований соответствуют решаемым соискателем задачам, результаты теоретических исследований и натуральных экспериментов, выполненных соискателем, достоверны и достаточны для обоснования сделанных выводов.

Диссертация имеет практическую ценность, так как полученные соискателем результаты позволяют повысить быстроходность ШУ. Использование результатов работы, представленных в виде инженерной методики и конструкторско-технологических рекомендаций, имеет хорошую перспективу.

Степень апробации результатов работы достаточна. Общая подготовленность и научный потенциал соискателя отвечают требованиям, предъявляемым к соискателям ученой степени кандидата технических наук. Научные выводы и практические результаты отражают в полном объеме основные результаты работы, полученные в ходе диссертационного исследования. Автореферат в достаточной степени отражает содержание диссертационной работы и позволяет оценить основные результаты, полученные лично соискателем, а также выводы и рекомендации, вытекающие из проведенных исследований.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Подкругляк Л.Ю. по актуальности, научно-техническому уровню, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверности и новизне, значению для теории и практики соответствует требованиям п.п. 9 - 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а её автор, Подкругляк Любовь Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и

оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки). Спасибо за внимание.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Александр Павлович, за отзыв и за пояснения. Любовь Юрьевна, пожалуйста, ответьте на замечания Александра Павловича.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

С первым и четвертым замечаниями согласна.

Ответ на второе замечание: толщина псевдосреды определяется по формуле (2.3) стр. 46, представленной в диссертации. Результаты исследования зон контакта, приведенные в открытых источниках, показали, что при соблюдении соотношения  $q_a/\sigma_T \leq 0,1$  значение толщины псевдосреды может быть представлено более простой зависимостью (2.4). При этом погрешность расчета не превышает 6,5 %, что вполне допустимо для инженерных расчетов.

Ответ на третье замечание: моделирование в среде ELCUT позволило определить основные факторы, формирующие характеристики псевдосреды. Моделирование же экспериментальной установки МКЭ позволило подтвердить результаты натуральных экспериментов и адекватность предложенной инженерной методики с использованием ККЭ и полученной регрессионной зависимости изменения температуры в зоне контакта.

Ответ на пятое замечание: по паспорту для станка 24К40СФ4 используется пластичная смазка марки JSOFLEX NBU 15 фирмы «KLUEBER LUBRICATION» Германия. Для моделирования ШУ при жидкостной смазке в модель необходимо внести коэффициент, учитывающий отведение части тепловой мощности из источников.

Ответ на шестое замечание: для расчетов применялась плоскоступенчатая модель, которую рекомендуется использовать, если из-за значительных диаметральных размеров модели толщины элементов ШУ отличаются в 2 и более раз. У плоскоступенчатой модели в отличие от плоской, представленной тонкой пластиной постоянной толщины, толщина ККЭ увеличивается по мере удаления от оси симметрии конструкции.

Ответ на седьмое замечание: понятия «существенные факторы» и «основные факторы» одинаково верные, можно еще применить понятие «доминирующие» - все это применительно к свойствам прсевдосреды синонимы.

Александр Павлович, спасибо большое.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо. Александр Павлович, Вы удовлетворены ответами?

**Официальный оппонент - д-р техн. наук Кузнецов А.П.**

Да, полностью.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Слово для отзыва предоставляется официальному оппоненту – канд. техн. наук, доценту Добрякову Владимиру Анатольевичу.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Уважаемые члены совета. Связь не очень хорошая. Может быть нам воспользоваться изменениями в Положение о совете по защите диссертаций (приказ Министерства образования и науки №458 от 07.06.2021г.), в соответствие с которым в случае разрыва связи с лицом, не являющемся членом совета, участвующим в интерактивном режиме и давшем положительный отзыв, отзыв может быть оглашен ученым секретарем совета. Владимир Анатольевич, есть предложение, что Ваш отзыв огласит ученый секретарь Совета, так как связь плохая и часть слов не слышно. Вы не возражаете?

**Официальный оппонент – канд. техн. наук, с.н.с., доцент Добряков В.А.**

Да, пожалуйста.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Слово предоставляется ученому секретарю Веткасову Н.И., который зачитает отзыв Добрякова В.А.

**Ученый секретарь – д-р техн. наук, доцент Веткасов Н.И.**

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу Подкругляк Л.Ю. Структура работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» и состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы (204 источника) и 4 приложений.; основной текст изложен на 131 странице, включая 68 рисунков и 30 таблиц. Структура и объем работы соответствуют требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

**Публикации и апробация работы.** По теме диссертации опубликованы 14 работ, в том числе 4 статьи в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, сделаны доклады на 7 конференциях различного уровня, что свидетельствует широком отражении результатов диссертации в научно-технических изданиях.

**Актуальность темы.** Актуальность темы диссертации связана с необходимостью совершенствования конструкций современных металлорежущих станков (МРС) на основе повышения их быстроходности, обеспечивающей рост производительности обработки с сохранением требуемой точности. Однако сдерживающим фактором при этом выступает повышение температуры шпиндельных узлов (ШУ), точность которых на 80% определяет точность станка в целом. Согласно многочисленным исследованиям тепловая погрешность МРС составляет 40-70% в общем балансе погрешностей, и она тем больше, чем выше требования, предъявляемые к точности обрабатываемых деталей. Тепловые потоки в узлах станков имеют весьма сложный характер в связи с большим числом деталей, входящих в их конструкцию. В связи с этим формирование тепловых потоков определяется не только распространением тепла от источников через сплошные детали, но, в значительной мере, через контакты деталей между собой. Несовершенство контакта на границе раздела твердых тел приводит к возникновению контактного термического сопротивления

(КТС). Учет КТС в используемых тепловых моделях дает возможность обоснованно управлять тепловыми потоками в особо точных узлах металлорежущих станков за счет конструкторских и технологических мероприятий, что определяет задачу повышения быстроходности ШУ за счет моделирования КТС несомненно актуальной в представленной диссертационной работе.

**Общая характеристика работы.** Среди множества факторов, влияющих на быстроходность и точность станка, большое значение имеют температурные погрешности. При этом главным источником температурной погрешности станка выступает тепловыделение в ШУ.

Анализ существующих тепловых моделей ШУ, применяемых для оценки влияния таких параметров эксплуатации ШУ, как частота вращения, нагрузка на шпиндель, предварительный натяг в опорах, показатели свойств смазочного материала и др., на тепловые характеристики ШУ, показал обоснованную необходимость обеспечения теплостойкости ШУ, как одного из важнейших проектных критериев.

Решена задача построения математической модели формирования КТС основе регрессионного анализа. Проведенные натурные эксперименты выявили закономерности влияния конструкторско-технологических факторов на контактное термическое сопротивление плоского стыка.

Разработана инженерная методика определения распространения тепловых потоков в сборочных единицах с использованием ККЭ, позволяющая исключить применения сложных специализированных программных продуктов и максимально учесть конструкторско-технологические параметры. Предложенная автором методика на основании решения системы алгебраических уравнений теплового баланса для узловых точек тепловой модели дала возможность определить температуру в любой точке конструкции. Данная методика была применена также при моделировании теплового состояния опоры ШУ.

Предложены конструкторско-технологические решения, позволяющие снизить температуру подшипников шпинделя, что дает возможность повысить частоту его вращения, то есть повысить его быстроходность и интенсифицировать режимы высокоточной обработки на примере реализации на станке модели 2440СФ4.

Практическая реализация результатов работы в ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара), а также использование в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ, подтверждается актами внедрения.

Диссертация обладает внутренним единством, а предложенные автором решения в достаточной степени аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями, полученные результаты достоверны. Работа хорошо методически проработана, базируется на обширном

экспериментальном материале, написана технически грамотно, иллюстрирована большим количеством рисунков и оформлена в соответствии с требованиями ВАК. По каждой главе и работе в целом сделаны обоснованные выводы.

**Научная новизна работы.** Научная новизна заключается в разработке и обосновании модели теплопроводности соединений деталей на основе использования псевдослоя, характеристики которого учитывают макро-и микроотклонения контактирующих поверхностей. Выявлена степень влияния конструкторско-технологических факторов на контактные термические сопротивления, что позволило установить закономерности формирования температурных полей шпиндельных узлов в условиях нескольких источников тепловыделения.

**Степень достоверности результатов работы.** Достоверность результатов подтверждается качественной аналогичностью результатов, полученных при математическом обосновании, сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также данных моделирования с результатами их экспериментальной проверки.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** Разработана методика определения теплового состояния деталей ШУ с использованием ККЭ. Получена регрессионная зависимость для определения КТС, позволяющая оценивать его с учетом основных параметров, задаваемых конструктором при проектировании. Предложены конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности ШУ и улучшению теплообмена в его конструкции за счет выполнения кольцевых канавок.

Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению в виде инженерной методики построения температурных полей с использованием крупноблочных конечных элементов шпиндельного узла в ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара), а также использованы при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ.

**Предложения по расширенному использованию.** Практические результаты диссертационной работы могут быть использованы на станкостроительных и машиностроительных предприятиях при проектировании, эксплуатации и модернизации высокоточного технологического оборудования.

Автореферат. Структура и содержание автореферата соответствуют требованиям ВАК. Автореферат дает достаточно полное представление о научно-технических результатах диссертации.

#### **Замечания по работе.**

1. В выводах по 1 главе четко не сформулированы существующие отличия и преимущества направления моделирования тепловых полей,

предложенного автором, по сравнению с известным методом конечных элементов, который им критикуется.

2. По результатам теоретических и экспериментальных исследований автором предложен ряд конструктивно-технологических решений при проектировании шпиндельного узла станка, в частности, рекомендовано увеличение площади наружных теплоотдающих поверхностей путем выполнения кольцевых проточек на свободной от посадки поверхности гильзы ШУ. В работе указывается, что был произведен соответствующий расчет кольцевых канавок, однако не приведены цифровые значения размеров профиля канавок как результат их расчета, а показаны только форма профиля с буквенными обозначениями (рис. 5.12).

3. В общих выводах по работе не просматривается четко сформулированный вывод по обширному обзорному материалу, приведенному автором в 1 главе.

4. В выводе 7 в общих выводах указывается, что предложены конструкторско-технологические решения, позволяющие снизить температуры подшипников шпинделя станка модели 2440СФ4 (объекта исследования), что дает возможность повысить частоту вращения шпинделя с 4000об/мин (у базового варианта) до 5000об/мин (при работе с пластичной смазкой) и до 6300 об/мин (при работе с жидкой смазкой). Однако из паспортных данных станка следует, что 4000 об/мин - это максимальная частота вращения шпинделя, следовательно, для увеличения частоты вращения до 5000 об/мин и выше необходимо произвести модернизацию привода шпинделя станка, что не нашло отражение в материалах диссертации.

**Заключение.** Представленные выше замечания не затрагивают основные положения и выводы работы, которая обладает актуальностью, научной новизной и практической ценностью, что подтверждается актами внедрения ее результатов.

Рассмотренная диссертация является законченной научно-исследовательской работой, содержащей решение задачи, связанной с определением основных факторов, влияющих на контактное термическое сопротивление в стыках ШУ, разработкой методики определения теплового состояния ШУ с использованием ККЭ и конструкторско-технологических решений по повышению быстроходности ШУ на основе температурного критерия.

Работа соответствует паспорту специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки) по направлениям исследований по пунктам 1, 4 и 6.

Диссертация соответствует критериям пунктов 9, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Считаю, что автор работы, Подкругляк Любовь Юрьевна, заслуживает присуждения

ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Николай Иванович. Любовь Юрьевна, пожалуйста, ответы на замечания Владимира Анатольевича.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

С первым и третьим замечаниями согласна.

Ответ на второе замечание: форма профиля с буквенными обозначениями представлена для того, чтобы подтвердить увеличение площади наружных теплоотдающих поверхностей в 2 и 3 раза соответственно при произвольно выбранном значении «а». Конкретные значения «а» будут определяться размерами гильзы шпинделя и технологическими возможностями выполнения канавок.

Ответ на четвертое замечание: вопрос модернизации привода шпинделя станка не нашел отражения в материалах диссертации так как это не являлось задачей исследований. Однако модернизация привода с целью увеличения частоты вращения с учетом развития теории и практики использования бесступенчатого регулирования с применением асинхронных двигателей частотного регулирования не представляет трудностей. Спасибо большое Владимир Анатольевич.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Владимир Анатольевич, Вы удовлетворены ответами соискателя?

**Официальный оппонент – канд. техн. наук, с.н.с., доцент Добряков В.А.**

Да, полностью удовлетворен.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо большое, Владимир Анатольевич, спасибо за участие. Приступаем к процедуре обсуждения. Кто хочет выступить? Пожалуйста, д-р техн. наук Лобанов Д.В.

**Д-р техн. наук, доцент Лобанов Д.В.:**

Тематика, безусловно, актуальна, учитывая современное состояние станкостроения нашей страны. Любовь Юрьевна могла бы сделать больший акцент с точки зрения связи между быстроходностью и тепловым состоянием. Однако если учесть, что на сегодняшний день именно моделирование и цифровые двойники являются достаточно мощным инструментом для прогнозирования поведения системы, то учитывая результаты диссертации, а это порядка 15-17 % повышения быстроходности на основе моделирования, это говорит о том, что она имеет в дальнейшем достаточно эффективное продолжение. При введении в эти модели, которые уже имеются, других составляющих, они могут быть еще усовершенствованы, что позволит повысить точность качества исследования, а следовательно есть возможность исследования и тематику продолжить. Надо отметить еще, что фактически хотелось бы увидеть не только

результаты моделирования, но на мой взгляд, можно было бы представить четкие рекомендации по конструкторским параметрам или качественным характеристикам тех самых ШУ, которые могут подвергаться восстановлению и ремонту. Техподдержка на основе этих данных может осуществляться гораздо более эффективно. Тем не менее, надо понимать, что сам соискатель прекрасно владеет ситуацией, диссертация достаточно апробирована и соответствует паспорту специальности в полной мере, следовательно, я предлагаю эту диссертацию поддержать. Я буду голосовать «за» и призываю членов совета сделать также.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Дмитрий Владимирович. Кто еще? Пожалуйста, д-р техн. наук Б. М. Горшков.

**Д-р техн. наук, профессор Горшков Б.М.:**

Я являюсь специалистом в области оборудования, поэтому тематика диссертанта мне очень близка. Что касается выступления, были вопросы, которые связаны с повышением быстроходности, что такое быстроходность? Быстроходность и частота вращения – это в принципе синонимы. Надо признать, что это вопрос конечно важный, но на него требуются пояснения. Это связано с частотой вращения: в чем измеряется? Вопрос, почему такая частота вращения станка, который имеется в лабораторной базе СамГТУ. Это координатно-расточной станок, класса С – это самый высший класс и частота вращения о которой говорили здесь – 25 тыс., 50 тыс., 70 тыс. об/мин она не касается этой работы ни каким образом. Такие станки, у которых частота вращения 70 тыс. об/мин., имеют пневматические опоры, другой вид смазки и т.д. – это шлифовальные станки, они направлены совсем на другое. А этот станок, он не совсем новый и работа, которая проведена на базе этого станка, она позволяет и предлагает дальнейшую модернизацию оборудования, которое существует. Поэтому здесь не нужно касаться подшипников, которые мы не выпускаем: керамические, металлокерамические подшипники. Здесь предлагается методика расчета, которая позволяет совершенствовать конструкцию и позволяет повысить частоту вращения на 10-15%, что в принципе очень даже возможно, с точки зрения управления частотой вращения. Работа актуальная, что касается внедрения - прекрасно, работа доложена на хорошем уровне. Я буду голосовать «за» и призываю вас к тому же.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Борис Михайлович. Кто еще? Владислав Николаевич? Пожалуйста, д-р техн. наук Ковальногов В.Н.

**Д-р техн. наук, доцент Ковальногов В.Н.**

Несмотря на то, что соискатель иногда не очень убедительно отвечал на некоторые вопросы, мне работа в целом понравилась. Виден большой объем качественно проделанной работы. Объем исследований, в том числе и экспериментальный, очень трудоемкий. Поэтому я считаю, что работа

соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Это завершенная научно-квалификационная работа. Я буду голосовать «за».

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо. Есть еще желающие выступить? Д-р техн. наук Чигиринский Юлий Львович, Волгоградский государственный технический университет.

**Д-р техн. наук, профессор Чигиринский Ю.Л.**

Есть два момента, которые меня зацепили. Момент первый, то, что касалось оценки шага сетки при КЭМ и того, что в работе появились уравнения. Наверное, 99% работ, которые я видел за последние несколько лет, в которых встречались твердотельные КЭМ сделанные в Ansys, SolidWorks, сделанные в чем угодно – это красивая картинка, минимальная погрешность и совершенно невнятный ответ на вопросы: какая система дифференциальных уравнений лежит в основе этого решения? Какие конечные и начальные условия? В этой работе приводятся уравнения, анализируется шаг сетки и соответственно устойчивость и сходимость решения, это то, что говорит о качестве выполненной работы. Второй момент, я бы ответил на вопросы профессора Лобанова относительно погрешности моделирования и такая немного скептическая реакция членов Совета, да и моей тоже на ответ: 3-4%. Забыли одно слово – систематическая погрешность 3-4%, а случайная 10-12%. В сумме чуть больше 15% и это вполне естественно. Если бы у меня был голос в этом совете, я бы голосовал «за». Это хорошая, достойная работа.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо, Юлий Львович. Если у нас больше нет желающих, пожалуйста, Любовь Юрьевна, Ваше заключительное слово.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Я хочу сказать огромное спасибо своему руководителю. Я, очень много узнала от него в течение этих лет, в процессе работы, большой поклон ему. Благодарю членов совета, что Вы уделите время, чтобы выслушать меня, задать свои вопросы. Тех, кто меня поддержал, вдвойне благодарю, для меня это очень важно. Спасибо.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Спасибо. Переходим к голосованию. Есть предложения по составу счетной комиссии? Есть предложение включить в состав счетной комиссии: д-ров техн. наук Унянина А.Н., Горшкова Б.М., Ковальногова В.Н.

Если возражений нет, прошу проголосовать. Кто за? Единогласно. Прошу счетную комиссию приступить к работе. Кто за то, чтобы объявить технический перерыв на голосование. Все за. Объявляется технический перерыв на голосование.

*Счетная комиссия организует тайное голосование.*

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Продолжаем нашу работу. Слово предоставляется председателю счетной комиссии д-р техн. наук Унянину А.Н. для оглашения результатов тайного голосования.

**Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.**

Протокол № 1 заседания счетной комиссии, избранной диссертационным советом 99.2.001.02 от 26 декабря 2023 года. Состав комиссии: Унянин А.Н., Ковальногов В.Н. и Горшков Б.М. Комиссия избрана для подсчета голосов при тайном голосовании по диссертации Подкругляк Л.Ю. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 15 человек, дополнительно в состав диссертационного совета введено 0 человек, присутствовало на заседании 11 членов совета, в том числе докторов наук по профилю рассматриваемой диссертации – 8. Роздано бюллетеней - 11, осталось не розданными бюллетеней – 4, оказалось в урне бюллетеней - 11. Результаты голосования по вопросу присуждения ученой степени кандидата технических наук Подкругляк Л.Ю.: за – 11, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Предлагаю утвердить результаты тайного голосования. Кто за? Кто против? Воздержался? Единогласно. На основании результатов тайного голосования (за – 11, против – нет, недействительных – нет) объединенный диссертационный совет 99.2.001.02, созданный при Ульяновском государственном техническом университете и Тольяттинском государственном университете признает, что диссертация Подкругляк Любови Юрьевны представляет собой научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной задачи повышения быстроходности шпиндельных узлов металлорежущих станков, на основе прогнозирования температурных полей при моделировании теплопроводности соединений с учетом их макро- и микроотклонений, имеющей существенное значение для развития станкостроения. Работа соответствует критериям, установленным в разделе II п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г., и присуждает Подкругляк Любови Юрьевне ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Любовь Юрьевна, разрешите мне от имени совета поздравить Вас с успешной защитой диссертации и пожелать Вам здоровья и новых творческих успехов.

**Соискатель Подкругляк Л.Ю.**

Спасибо.

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

У членов совета имеется проект заключения по диссертации Подкругляк Л.Ю. Есть предложение принять его за основу. Нет возражений? Нет. Принимается. Какие будут дополнения, замечания к этому проекту?

*Обсуждение заключения.*

**Председатель – д-р техн. наук, профессор Табаков В.П.**

Есть предложение принять заключение в целом с учетом тех замечаний, которые возникли в процессе обсуждения. Нет возражений? Прошу проголосовать за данное заключение. Кто за? Против? Воздержался? Принимается единогласно.

*Заключение диссертационного совета объявляется соискателю*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА  
99.2.001.02, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО  
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «УЛЬЯНОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» И  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело №\_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 26.12.2023 №80

О присуждении Подкругляк Любови Юрьевне, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния» по специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)» принята к защите 24.10.2023 г., протокол №78, объединенным диссертационным советом 99.2.001.02, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения (ФГБОУ) высшего образования (ВО) «Ульяновский государственный технический университет», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», Министерства науки и высшего образования РФ, по адресу 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, действующим на основе приказа №123/нк от 17.02.2015 г.

Соискатель Подкругляк Любовь Юрьевна, 18 января 1963 года

рождения. В 1985 году соискатель окончила Куйбышевский политехнический институт им. В.В. Куйбышева по специальности «Машины и технологии литейного производства» и получила квалификацию инженер-механик. В период подготовки диссертации соискатель Подкругляк Любовь Юрьевна работала в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» в должности старшего преподавателя. В 2023 году окончила очную аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный технический университет» по направлению подготовки 15.06.01. – Машиностроение, профиль 05.02.07 - «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)».

Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты», Министерства науки и высшего образования РФ.

**Научный руководитель** – Денисенко Александр Федорович, профессор, д.т.н., профессор кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

**Официальные оппоненты:**

1. Кузнецов Александр Павлович, доктор технических наук, советник Генерального директора ООО «КЕВ-РУС», г. Дзержинск, Московская обл.

2. Добряков Владимир Анатольевич, кандидат технических наук, с.н.с., доцент кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А., г. Саратов, дали свои положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, в своем положительном заключении, рассмотренном на заседании кафедры «Технология машиностроения, обрабатывающие станки и комплексы» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», подписанном д.т.н., профессором, заведующим кафедрой А.Н. Поляковым и к.т.н., доцентом кафедры С.В. Каменевым и утвержденном проректором по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д.ф.-м. н., профессором С.Н. Летутой, указала, что диссертация Подкругляк Л.Ю. на тему «Повышение быстроходности шпиндельного узла на основе моделирования его теплового состояния» представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности шпиндельных узлов МРС, имеющие существенное значение для развития станкостроения.

Диссертационная работа по актуальности темы, новизне научных положений и практической значимости, объёму выполненных исследований соответствует критериям, изложенным в пунктах 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор работы, Подкругляк Любовь Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Соискатель имеет 14 опубликованных работ по теме диссертации, в том числе 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях из базы цитирования Scopus и WebofScience.

Работы посвящены теоретическим и экспериментальным исследованиям контактного термического сопротивления в соединениях деталей шпиндельного узла, оценке влияния конструкторско-технологических факторов на быстроходность ШУ, определению параметров конечно-элементной модели температурного поля ШУ и др. Авторский вклад составляет 3,28 п.л. машинописного текста, в общем объеме научных изданий – 6,38 п.л.

Научные работы соискателя отражают результаты проведенного исследования и раскрывают основные положения, выносимые на защиту. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах. Научные труды представлены статьями в рецензируемых изданиях из перечня ВАК, из базы цитирования Scopus и WebofScience, материалах научных конференций. Наиболее значимые научные работы соискателя, из числа опубликованных в рецензируемых научных изданиях:

1. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Разработка тепловой модели шпиндельной опоры металлорежущего станка // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2020. - Т. 22. - № 3(95). - С. 49-55.

2. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Построение регрессионной модели термического сопротивления контактной псевдосреды // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2021. - Т. 23. - № 3(101). - С. 47-54.

3. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Исследование неполной регрессионной модели термического сопротивления контактной псевдосреды // Транспортное машиностроение. - 2023. - №6(18). - С. 12-20.

4. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Моделирование контактного термического сопротивления при проектировании технологического оборудования // Frontier Materials & Technologies. - 2023. - №3. - С. 31-42.

5. Denisenko A.F., Podkruglyak L. Yu. Heat model of a spindle support of a precision metal cutting machine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971. - (2020). - 022020.

6. Denisenko A.F., Grishin R.G., Podkruglyak L. Yu. Simulation of a ContactPseudo-Environment in Calculating Thermal Resistance// MATEC Web of Conferences 346. - (2021). -03049.

7. Denisenko A.F., Grishin R.G., Podkruglyak L. Yu. Formation of Contact Thermal Resistance Based on the Analysis of the Characteristics of the Pseudo-Medium// Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021. - Cham. pp. 221–229.

8. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Определение параметров конечно-элементной модели температурного поля шпиндельного узла// Всероссийская науч.-практ. конф. с международным участием «Актуальные проблемы станкостроения – 2023 (АПС – 2023)».– Пенза.- 2023.- С. 45-51

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. Отзыв ведущей организации - **ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»** подписанный д.т.н., профессором, заведующим кафедрой А.Н. Поляковым и к.т.н., доцентом кафедры С.В. Каменевым и утвержденный проректором по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д. ф.-м. н., профессором С.Н. Летутой. Отзыв положительный со следующими замечаниями:

1. Регрессионные зависимости натуральных экспериментов изменения температуры в зоне контакта деталей подтверждены моделированием методом конечных элементов. Однако, не понятно, как при моделировании учитывалась шероховатость контактирующих поверхностей. 2. В работе нет информации о том, как выбираются размеры крупноблочных конечных элементов в предложенной инженерной методике. 3. В работе приведены результаты теплового анализа шпиндельного узла координатно-расточного станка мод. 2440СФ4. Автором не поясняется, как эти результаты можно распространить на другие типы станков. 4. В работе приведено упоминание о системе Ansys, однако в недостаточной степени автором аргументированы преимущества предлагаемой модели от моделей, реализуемых в современных профессиональных системах: AnsysMechanical, Siemens NX, SolidWorksSimulation, COMSOL Multiphysics, КОМПАС 3D (APM FEM) и др. 5. На рисунке 14 автореферата приведена достаточно простая расчетная модель гильзы шпиндельного узла, но ничего не сказано о существующих ограничениях по размерности и сложности предлагаемой тепловой модели, а также её программной реализации. 6. Автор выбрал в качестве инструментальной среды для разработки программного средства Mathcad, которая, как и упоминаемая автором в работе система Ansys, не является отечественной системой. В связи с этим возникает вопрос о возможности использования других интегрированных сред разработки для более эффективной разработки собственного программного средства.

Отмеченные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают её научной и практической ценности.

2. Отзыв официального оппонента - **Кузнецова Александра Павловича**, доктора технических наук, советника Генерального директора ООО «КЕВ-РУС». Отзыв положительный со следующими замечаниями:

1. При рассмотрении и анализе состояния вопроса (глава 1) недостаточно внимания уделено тенденциям развития конструктивного совершенства шпиндельных узлов и особенно применению новых материалов, например углепластиков, применение которых также имеет целью повышение быстроходности, а также особенностям шпиндельных узлов для высоко- и сверхскоростной обработки. 2. При планировании эксперимента (глава 2) с целью получения регрессионной зависимости снижения температуры в зоне плоского стыка не обосновано принятие допущения о значении толщины «псевдослоя», зависящим только от параметра шероховатости  $Ra$ ? 3. Не ясно, какая необходимость (глава 2) в проведении исследований и моделирования методом конечных элементов экспериментальной установки для этих же целей совместно, а также аналогичные вопросы о моделировании в среде ELCUT. 4. В тексте диссертации необходимо было бы разместить фотографии реального стенда, на котором проводились экспериментальные исследования. Кроме этого, далеко не все рисунки читабельны и информативны, например, рис. 2.3, 2.7, 2.9, 3.2, 3.5, 3.8 и др., имеются одинаковые обозначения разных величин т.е.  $q$  и тепловой поток и удельное давление. 5. В работе не указано, какая смазка используется в шпиндельном узле станка 24К40СФ4 и как вид смазки может быть учтен или учитывается в предлагаемой методике. 6. В главе 5 на стр. 104 указано «температуры наружных колец подшипников при температуре окружающей среды  $20^{\circ}\text{C}$ , рассчитанные по представленной в разделе 5.1.2 плоскоступенчатой модели», хотя на стр. 96 рис. 5.6 данного раздела указано, что модель плоская. Непонятно, какая на самом деле модель должна применяться для расчетов? 7. В диссертации в первой задаче используется понятие «существенные факторы», а в тексте автореферата «основные факторы». Какое понятие верное?

В целом приведенные замечания не снижают научной новизны, практической ценности полученных результатов и общей положительной оценки диссертационной работы.

3. Отзыв официального оппонента - **Добрякова Владимира Анатольевича**, кандидата технических наук, с.н.с., доцента кафедры «Техническая механика и мехатроника» Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю.А. Отзыв положительный со следующими замечаниями:

1. В выводах по 1 главе четко не сформулированы существующие отличия и преимущества направления моделирования тепловых полей, предложенного автором, по сравнению с известным методом конечных элементов, который им критикуется. 2. По результатам теоретических и экспериментальных исследований автором предложен ряд конструктивно-технологических решений при проектировании шпиндельного узла станка, в

частности, рекомендовано увеличение площади наружных теплоотдающих поверхностей путем выполнения кольцевых проточек на свободной от посадки поверхности гильзы ШУ. В работе указывается, что был произведен соответствующий расчет кольцевых канавок, однако не приведены цифровые значения размеров профиля канавок как результат их расчета, а показаны только форма профиля с буквенными обозначениями (рис. 5.12). 3. В общих выводах по работе не просматривается четко сформулированный вывод по обширному обзорному материалу, приведенному автором в 1 главе. 4. В выводе 7 в общих выводах указывается, что предложены конструкторско-технологические решения, позволяющие снизить температуры подшипников шпинделя станка модели 2440СФ4 (объекта исследования), что дает возможность повысить частоту вращения шпинделя с 4000 об/мин (у базового варианта) до 5000 об/мин (при работе с пластичной смазкой) и до 6300 об/мин (при работе с жидкой смазкой). Однако из паспортных данных станка следует, что 4000 об/мин – это максимальная частота вращения шпинделя, следовательно, для увеличения частоты вращения до 5000 об/мин и выше необходимо произвести модернизацию привода шпинделя станка, что не нашло отражение в материалах диссертации.

Представленные выше замечания не затрагивают основные положения и выводы работы, которая обладает актуальностью, научной новизной и практической ценностью, что подтверждается актами внедрения ее результатов.

4. Отзыв из **Забайкальского института железнодорожного транспорта – филиала ФГБОУ ВО ИрГУПС**, г. Чита, подписанный к.т.н., доцентом, доцентом кафедры «Прикладная механика и математика» Ильиных Виктором Анатольевичем.

Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. При применении инновационной конструкции гильзы с канавками разного профиля в ШУ автор не рекомендует при проектировании типы возможных предпочтительных посадок в соединении наружное кольцо подшипника – отверстие гильзы. В то время как посадка, которая используется в традиционных гильзах с гладкой наружной поверхностью, может быть иной. 2. Из текста автореферата следует, что при использовании псевдослоя учитываются макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей. При этом автором в качестве макроотклонения применяется искусственное отклонение формы в виде лунки максимальной глубиной 0,1 мм. Следует отметить, что это ненормируемое отклонение формы профиля. В отличие от принятых, например: некруглость, овальность, огранка, конусность и т.д. 3. В тексте автореферата на рисунке 13 стр. 12 технические требования к посадочным диаметральным размерам очень трудно прочитать.

5. Отзыв из **Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук**, г. Самара, подписанный д.т.н., заведующим лабораторией лазерно-индуцированных процессов Ярьсько Сергеем Игоревичем.

Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Как учесть результаты, полученные для плоского стыка в цилиндрических соединениях? 2. При разработке регрессионной модели (1) на стр. 7 не представлены результаты проверки ее адекватности по статистическим критериям Стьюдента и Фишера. 3. Почему в экспериментах не рассматривался образец с несимметричным расположением макроотклонения? 4. В таблицах 1-3 представлены результаты расчета температур в зависимости от различных технологических факторов. При этом отсутствуют сведения о погрешности вычислений. Вопрос: оказывают ли влияние столь мало отличающиеся данные на последующие выводы?

6. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»**, г. Пенза, подписанный д.т.н., профессором кафедры «Технология и оборудование машиностроения» Скрыбиным Владимиром Александровичем.

Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В автореферате отсутствуют понятия объекта исследования и предмета исследования, что не позволяет более полно определить сущность работы. 2. Не приведены расчетные схемы шпиндельных узлов и их связь с тепловыми потоками, что является основополагающим в теоретической части работы перед разработкой математической модели. 3. В работе отсутствуют расчеты по определению плотности теплового потока по площадке контакта в зоне трения, что не позволяет прогнозировать среднюю контактную и мгновенную температуру с учетом действия импульсных источников теплоты, благодаря чему обеспечивается требуемое качество обрабатываемых поверхностей.

7. Отзыв из **ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт машиностроения, материалов и транспорта**, г. Санкт-Петербург подписанный к.т.н., старшим преподавателем Высшей школы машиностроения Хлопковым Елисеём Алексеевичем.

Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. На стр. 6 указано, что для оценки влияния характеристик псевдосреды на условия формирования КТС толщина пластин задана равной 1 мм. Не дано пояснение почему выбрана такая величина и как влияет выбор толщины пластин на влияние характеристик псевдосреды? 2. На стр. 8 определено, что давление в стыке образцов менялось от 2 до 40 МПа. Покрывает ли такой диапазон давления в опорных узлах ШУ станка? Не указаны пределы давления в опорных узлах ШУ. 3. Для оценки влияния КТС автор указал шероховатость образцов с Ra 0,1 мкм (стр. 8), когда на рис. 5 стр. 9 пунктирная линия шероховатость одного из образцов с параметром Ra 3,2 мкм. В автореферате не указано, с какой целью проводилось сравнение. 4. Не указано расхождение значений результатов натуральных экспериментов и решения в среде Workbench Ansys. 5. Тепловая модель строилась для ШУ прецизионного координатно-расточного станка мод. 2440СФ4. На основе

расчета значений температур подшипников ШУ сделаны выводы об увеличении частоты вращения шпинделя. Однако не указано, как изменится погрешность обработки.

8. **Отзыв из ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, подписанный д.т.н., профессором кафедры Технология машиностроения Леоновым Сергеем Леонидовичем и д.т.н., доцентом Иконниковым Алексеем Михайловичем.**

Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Из автореферата непонятно, почему для построения регрессионной зависимости методом конечных элементов (глава 2) использована плоская модель контакта пластин? 2. Непонятно также, почему при построении регрессионной модели используется пакет ELCUT, а при решении задачи прохождения теплового потока через плоский стык в главе 3 – пакет Ansys?

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается широкой известностью их достижений в области проектирования металлорежущего оборудования, наличием научных разработок, публикаций в рецензируемых журналах и вкладом в развитие данного направления исследований, достаточной квалификацией, позволяющей оценить новизну представленных на защиту результатов, их научную и практическую значимость, обоснованность и достоверность полученных выводов. В ведущей организации и организациях, в которых осуществляют свою деятельность официальные оппоненты, выполнен значительный объем научных исследований, связанных с изучением процессов, рассматриваемых соискателем в диссертационной работе.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**разработана** двумерная численная модель с псевдосредой в зоне контакта, позволившая определить факторы, оказывающие доминирующее влияние на контактное термическое сопротивление;

**разработана** математическая модель изменения температуры при прохождении теплового потока через плоское соединение;

**предложена** инженерная методика определения распространения тепловых потоков в сборочных единицах с использованием крупноблочных конечных элементов, позволяющая исключить применение дорогостоящих CAE систем и максимально учесть конструкторско-технологические параметры;

**доказана** эффективность применения разработанных моделей для повышения быстроходности шпиндельных узлов;

**введено** понятие "крупноблочных конечных элементов", позволяющих на основании решения систем алгебраических уравнений теплового баланса определить температуру в любой точке конструкции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

**доказана** возможность повышения быстроходности шпиндельного узла путем моделирования теплопроводности соединений его деталей;

**применительно к проблематике диссертации результативно использованы** метод конечных элементов для моделирования прохождения теплового потока через плоский стык, натурный эксперимент по оценке влияния конструкторско-технологических факторов на контактное термическое сопротивление плоского стыка, а также многофакторное планирование эксперимента для получения регрессионной модели термического сопротивления соединения на основе использования контактной псевдосреды;

**изложены** результаты численного моделирования влияния характеристик псевдосреды на контактное термическое сопротивление;

**раскрыты** закономерности формирования температурных полей на тепловой модели шпиндельного узла в условиях нескольких источников тепловыделения;

**изучены** факторы, оказывающие доминирующее влияние на контактное термическое сопротивление и определена их значимость;

**проведена модернизация** известных математических моделей прохождения теплового потока через плоский стык, позволяющая определять контактное термическое сопротивление через параметр шероховатости и номинальное давление в контакте, задаваемые конструктором при проектировании.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

**разработаны и внедрены** в виде инженерной методики построения температурных полей шпиндельного узла с использованием крупноблочных конечных элементов на ЗАО «Стан-Самара» (г. Самара), а также в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ;

**определены** перспективы использования разработанных методик для шпиндельных узлов с несколькими источниками тепловыделения;

**создана** тепловая модель шпиндельного узла, позволяющая распространить ее на все осесимметричные шпиндельные узлы прецизионных станков;

**представлены** конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности шпиндельных узлов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

**для экспериментальных работ** использованы современные измерительные сертифицированные средства, показана достаточная статистическая воспроизводимость результатов исследований, выполненных по разработанным соискателем методикам;

**теория** базируется на основных положениях теории теплопроводности, на правилах электротепловой аналогии, теории метода конечных элементов и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

**идея диссертационного исследования базируется** на учете влияния характеристик псевдосреды на распространение тепловых потоков в шпиндельных узлах и анализе практики и обобщении передового опыта обеспечения теплостойкости шпиндельных узлов современных металлорежущих станков;

**использовано** сравнение результатов, полученных соискателем, с экспериментальными данными натуральных экспериментов и других ученых по тематике диссертационной работы.

**установлено** качественное и количественное соответствие авторских результатов исследования с результатами, представленными в научной литературе по данной тематике;

**использованы** современные информационные базы и научно-техническая литература по проектированию и обеспечению характеристик шпиндельных узлов;

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии на всех этапах процесса, определении цели и задач исследований, непосредственном участии в выполнении научных исследований, как теоретического, так и экспериментального характера, необходимых для решения поставленных задач и достижения цели диссертационной работы: **разработке** математической модели изменения температуры при прохождении теплового потока через плоское соединение и конечно-элементной модели плоского стыка, позволившей визуализировать тепловые поля, **разработке** тепловой модели шпиндельного узла в условиях нескольких источников тепловыделения, **разработке плана экспериментальных работ** по оценке влияния конструкторско-технологических факторов на контактное термическое сопротивление плоского стыка, **разработке** инженерной методики определения теплового состояния сборочных единиц станков с использованием крупноблочных конечных элементов; интерпретации и обобщении полученных данных, апробации и внедрении результатов исследования; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

В ходе защиты диссертации соискателем Подкругляк Любовью Юрьевной даны аргументированные ответы на заданные ей в ходе заседания вопросы. Вопросы и ответы на них приведены в стенограмме заседания диссертационного совета.

**Результаты исследований рекомендуется использовать:**

**на предприятиях машиностроительной отрасли,** занимающихся изготовлением, модернизацией и ремонтом металлорежущего оборудования;

**в проектно-конструкторских и научно-исследовательских институтах,** занимающихся разработкой новых конструкций металлорежущего оборудования;

**в высших учебных заведениях** при подготовке специалистов, бакалавров и магистров направления «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

