

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.2.001.02

Повестка дня

**ЗАЩИТА ДИССЕРТАЦИИ Якимова Михаила Владимировича
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ
НАУК**

**«Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения
изотропных упругих характеристик опор»**

Специальность:

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Официальные оппоненты:

Сабилов Фан Сагирович - доктор технических наук, профессор кафедры станков ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»»

Фецак Сергей Игоревич - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г.Оренбург

ЗАСЕДАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.2.001.02

27 декабря 2021 г.

На заседании присутствовали 16 членов Совета, из них 10 очно, 6 дистанционно, в том числе 10 докторов наук по специальности 2.5.5

№	Ф.И.О.	Ученая степень, звание	Научная специальность	Форма участия
1.	Табаков В.П. (председатель)	д-р техн. наук, профессор	2.5.5 – технические науки	очная
2.	Бобровский Н.М. (зам. председателя)	д-р техн. наук, профессор	2.5.6 – технические науки	дистанционная
3.	Веткасов Н.И. (ученый секретарь)	д-р техн. наук, доцент	2.5.5 – технические науки	очная
4.	Булыжев Е.М.	д-р техн. наук, доцент	2.5.6 – технические науки	очная
5.	Денисенко А.Ф.	д-р техн. наук, профессор	2.5.5 – технические науки	очная
6.	Епифанов В.В.	д-р техн. наук, доцент	2.5.5 – технические науки	очная
7.	Киселев Е.С.	д-р техн. наук, профессор	2.5.6 – технические науки	очная
8.	Клячкин В.Н.	д-р техн. наук, профессор	2.5.5 – технические науки	очная
9.	Ковальногов В.Н.	д-р техн. наук, доцент	2.5.5 – технические науки	очная
10.	Носов Н.В.	д-р техн. наук, профессор	2.5.6 – технические науки	очная
11.	Унянин А.Н.	д-р техн. наук, доцент	2.5.5 – технические науки	очная
12.	Драчев О.И.	д-р техн. наук, профессор	2.5.5 – технические науки	дистанционная
13.	Захаров О.В.	д-р техн. наук, доцент	2.5.5 – технические науки	дистанционная
14.	Лобанов Д.В.	д-р техн. наук, доцент	2.5.6 – технические науки	дистанционная
15.	Худобин Л.В.	д-р техн. наук, профессор	2.5.6 – технические науки	дистанционная
16.	Янюшкин А.С.	д-р техн. наук, профессор	2.5.5 – технические науки	дистанционная

Председатель
д.т.н., профессор

Учёный секретарь
д.т.н., доцент



(Handwritten signature of V.P. Tabakov)

В.П. Табаков

Н.И. Веткасов

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

Начинаем наше второе заседание! Еще раз обращаюсь к членам совета с напоминанием, которое говорил прошлый раз – пожалуйста не выключайте связь и микрофон, все должны присутствовать на экранах, чтобы не было недоразумений. На заседании присутствует шестнадцать человек, в том числе шесть в дистанционном формате, кворум – четырнадцать, необходимый кворум мы имеем. По специальности диссертации «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» присутствует десять докторов наук, как и на предыдущем заседании, так что наше заседание правомочно.

Объявляется защита диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук Якимова Михаила Владимировича по теме «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор». Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» Самарского государственного технического университета, научный руководитель: доктор технических наук, профессор Денисенко Александр Федорович. Официальные оппоненты: Сабиров Фан Сагирович, доктор технических наук, профессор кафедры станков Московского государственного технологического университета «Станкин». Фецак Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов» «Уфимского государственного авиационного технического университета». Письменные согласия на оппонирование данной работы были своевременно получены. Оба оппонента присутствуют на заседании совета в дистанционном формате. Заявления на участие в дистанционном формате своевременно получены. Ведущая организация «Оренбургский государственный университет». Вот такая информация по диссертации.

Слово предоставляется ученому секретарю совета Николаю Ивановичу Веткасову для оглашения документов из личного дела соискателя. Пожалуйста, Николай Иванович.

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

Уважаемый председатель, уважаемые члены совета, в личном деле соискателя имеются: заявление о принятии диссертации с визой председателя совета, личный листок по учету кадров, заверенный по месту работы, нотариально заверенная копия диплома специалиста по специальности «Профессиональное обучение (машиностроение)»; имеется заключение Самарского государственного технического университета, принятое на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты», в котором отмечается личное участие автора, степень обоснованности научных положений, степень научной ценности и, как итог, дается рекомендация о том, что данная работа может быть представлена к защите по специальности 2.5.5. - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; имеется удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов со следующими оценками: иностранный язык – хорошо, история и философия науки и специальная дисциплина – отлично; имеется список публикаций, включающий двадцать три наименования, в том числе девять статей в рецензируемых научных изданиях; имеется протокол заседания совета о приеме диссертации к предварительному рассмотрению, положительное заключение экспертной комиссии диссертационного совета, подписанное доктором технических наук, профессором Полянсковым Юрием Вячеславовичем, доктором технических наук, доцентом Ковальновым Владиславом Николаевичем, и доктором технических наук, профессором Киселевым Евгением Степановичем о возможности защиты диссертации в нашем диссертационном совете и ее соответствие требованиям ВАК к изложению материалов в автореферате и диссертации в соответствии с данной специальностью 2.5.5; имеется отзыв научного руководителя, протокол заседания диссертационного совета, о приеме диссертации к защите, содержатся также сведения о ведущей организации, официальных оппонентах, отзывы ведущей организации и оппонентов, кроме того представлены отзывы, пришедшие на автореферат. Все необходимые документы были

опубликованы на сайте университета в сети Интернет в соответствии с требованиями процедуры заседания Совета и рассмотрения диссертации.

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

Есть вопросы к Николаю Ивановичу? К соискателю? Тоже нет. Тогда вам, Михаил Владимирович, предоставляется слово для изложения основных положений работы в пределах, как мы говорили, двадцати минут. Пожалуйста.

Соискатель Якимов М. В.

Точность станка зависит от ряда факторов, связанных с основными формообразующими подсистемами. Одной из важнейших подсистем является шпиндельный узел (ШУ). На долю шпиндельного узла (ШУ) приходится от 50 до 80% погрешностей в общем балансе точности станка. Требование высокой точности ШУ часто дополняется обеспечением ее стабильности не только во времени, но и в пространстве.

Вопросам обеспечения качества ШУ посвящены труды Н.С. Ачеркана, З.М. Левиной, А.С. Проникова, В.Э. Пуша, Д.Н. Решетова, Ф.С. Сабирова, В.С. Хомякова, С.С. Кедрова и других отечественных и зарубежных ученых. Слайд 2.

Для оценки точности шпиндельных узлов можно использовать траектории движения его опорных точек. Вектор траектории движения переднего конца шпинделя складывается из вектора геометрических погрешностей ШУ и вектора погрешностей от действия силовых факторов.

Радиальное биение шпиндельного узла, как основная характеристика его точности, зависит от расположения опор и биений подшипников. Геометрические погрешности проявляются в том, что траектория перемещения переднего конца шпинделя является окружности, с радиусом δ_z . При действии внутреннего силового фактора, связанного с неуравновешенностью шпинделя, радиус круговой траектории увеличивается до значения $\delta_z + \delta_{c1}$. Данная траектория наблюдается только в том случае, если жесткость опор является одинаковой и не зависит от направления действия силы. Непостоянство жесткости опор приводит к увеличению радиального биения на величину. Слайд 3.

Точность вращения шпинделя наряду с действием дисбаланса определяется влиянием внешних силовых факторов таких как сила резания и сила от приводного элемента.

Ось шпинделя, имеющего дисбаланс, движется по траектории, именуемой кинетической. Если жесткостные свойства опор изотропные, т.е. не зависят от направления действия нагрузки, то кинетическая траектория имеет форму окружности. Но реальные конструкции шпиндельных опор имеют как правило анизотропные упругие характеристики, и это приводит к тому, что траектория, описываемая центром (осью) шпинделя принимает форму эллипса.

Упругие характеристики опор удобно представлять в виде годографа. Годограф строится в полярной системе координат и представляет собой замкнутую кривую, которая соединяет концы радиус-векторов упругих перемещений, либо жесткостей, либо податливостей. Анизотропность упругих характеристик опор характеризуется тем, что форма годографа является отличной от окружности. Слайд 4.

Например, на основании исследований, проведенных ЭНИМС, были получены эпюры податливости радиальной податливости шпиндельного узла расточного станка с биением 1 мкм.

Кроме этого была получена зависимость, позволяющая определить овальность обработанных отверстий при растачивании. Помимо ряда факторов, входящих в эту зависимость, стоит выделить систематическую погрешность, зависящую от неравномерности радиальной податливости шпиндельного узла, т.е. анизотропии податливости опор. Слайд 5.

Упругие характеристики опор определяются жесткостью подшипников и условиями монтажа подшипника в корпус. Корпуса шпиндельных узлов современных токарных станков и обрабатывающих центров имеют различную форму. У станков с совмещенным приводом главного движения это как правило параллелепипед, но встречаются и цилиндрические корпуса.

Анализ конструкций корпусов показывает, что отверстия под подшипниковые опоры, как правило, смещены относительно геометрического центра стенок и перегородок, и, соответственно, под действием радиальной нагрузки это может приводить к искажениям формы отверстий под подшипники. Слайд 6.

На анизотропию податливости подшипниковых опор большое влияние оказывает отклонение от круглости дорожек качения, которое закладываются не только на этапе изготовления, но и на этапе монтажа в связи с тем, что имеются отклонения от круглости посадочных поверхностей корпуса и вала.

Подтверждением данной теории является эксперимент по монтажу подшипника типа NN 3020K при посадке в отверстие корпуса, имеющее отклонение от круглости,

Как видно из графиков, податливость подшипника будет различной в зависимости от направления действующей радиальной нагрузки. Также стоит отметить, что на графике показана зависимость податливости от радиальной нагрузки и натяга в подшипнике Слайд 7.

Для оценки эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов используются различные математические модели, которые учитывают собственную жесткость шпинделя, представляющего собой вал переменного сечения, действие силовых факторов: силы резания и сил от приводного элемента, а также упругие характеристики опор, как правило отражающие их конструктивные особенности. Слайд 8.

Основные цели и задачи исследования представлены на слайде 9.

На основании того, что упругие перемещения в опорах качения шпинделей складываются из упругих сближений тел качения и колец, а также упругих контактных перемещений в посадочных местах разработана структурно-параметрическая модель радиальной податливости опоры качения.

Разработанная структурно-параметрическая модель позволила выполнить ряд исследований по анализу влияния отмеченных в модели параметров на упругие характеристики опоры.

На первом этапе проведено численное моделирование упругих характеристик опоры шпиндельного узла, учитывающее непостоянство жесткости, вызванное наличием отклонения от круглости посадочных поверхностей вала и корпуса. Слайд 10.

По результатам численного моделирования установлено, что анизотропия жесткости подшипников шпиндельных узлов возрастает при увеличении отклонения от круглости посадочных поверхностей, в частности при увеличении отклонения от круглости от 1 до 3 мкм анизотропия жесткости возрастает от 1,13 до 1,42. Слайд 11.

Дальнейшее моделирование учитывало наряду с контактными деформациями, деформации колец подшипника, что с учетом наличия погрешностей формы посадочных поверхностей корпуса и вала, приводит к смещению центра вала при запрессовке.

Так, при отклонениях от круглости вала 5,5 мкм и корпуса 10 мкм максимальное смещение оси вала в случае одинакового расположения погрешностей вала и корпуса (первая схема) может достигать 3,7 мкм; при перпендикулярном расположении – 2,5 мкм. Слайд 12.

На основании этого рекомендуется запрессовывать подшипник при перпендикулярном расположении погрешностей вала и корпуса.

Предложенная структурно-параметрическая модель и проведенное численное моделирование показали, что разработка объемной конечно-элементной модели опоры представляет определенные трудности и часто не реализуема. В связи с этим были проведены численные эксперименты по разработке конечно-элементной модели без детализации конструкции подшипника, но с сохранением его упругих характеристик.

Проведенные исследования показали, что при определении упругих характеристик опор качения подшипник может быть представлен в виде сплошного кольца с упругими характеристиками материала, которые должны выбираться по соответствию упругих перемещений, рассчитанных по аналитическим зависимостям и полученных численным моделированием. Слайд 13.

Свойства материала для конечно-элементной модели подшипника в виде сплошного кольца выбирались на основе проведения полного факторного эксперимента, в результате которого было получено уравнение регрессии упругих. Данное уравнение регрессии позволяет подобрать шесть модулей упругости материала конечно-элементной модели подшипника. Слайд 14.

Проверка адекватности полученной модели по статистическим критериям Стьюдента и Фишера не представляется возможным в связи с тем, что при численном моделировании дисперсия воспроизводимости равна нулю. Поэтому адекватность модели оценивалась путем сравнения результатов расчета перемещений по регрессионному уравнению и результатов, полученных в ходе численного моделирования. Результаты проверки адекватности представлены в таблицах на слайде 15.

На основе разработанной модели подшипника в виде сплошного кольца предложена секторная конечно-элементная модель. Секторная конечно-элементная модель строится на основе годографов упругих характеристик опор и позволяет, путем задания упругих свойств секторов, смоделировать любую форму анизотропии податливости опор. Слайд 16.

Проведенные ранее исследования показали существенное влияние на анизотропию жесткости опор оказывает точность изготовления посадочных поверхностей отверстий корпуса.

Однако, при эксплуатации, под действием центробежной силы от дисбаланса шпинделя при несимметричной конструкции корпуса шпиндельного узла появляются дополнительные искажения формы посадочных отверстий под подшипники, что подтверждается численным моделированием шпиндельной бабки станка «Вектор».

Величины перемещений меняются при изменении направления действия силы дисбаланса, что говорит о анизотропии жесткости посадочного отверстия под подшипник. Слайд 17.

Дополнительные искажения цилиндрической поверхности корпуса под подшипники шпинделя, наблюдаются не только у корпусов призматической формы (как на слайде 18), но и у корпусов цилиндрической формы - слайд 19.

При численном моделировании анизотропии посадочных поверхностей под подшипники различных видов корпусов, учитывались их конструктивные особенности и исполнения.

С использованием представленной выше методики численного моделирования построены годографы упругих перемещений отверстия под переднюю опору шпинделя корпусов шпиндельных узлов станков с отдельным приводом и совмещенным приводом.

Как видно из годографов наибольшая анизотропия характерна для станков с отдельным приводом. Слайд 20.

Искажение формы отверстий под шпиндельные подшипники также может быть вызвано нагревом подшипников при эксплуатации. В ходе экспериментальных исследований были получены распределения температур в области передней опоры токарного станка при работе в течение часа. Эти данные были использованы при моделировании температурных деформаций корпуса шпиндельной бабки.

Анализ результатов моделирования показал, что под действием температуры наблюдается смещение оси шпинделя на 20 мкм и появление отклонения от круглости 44 мкм. На слайде 21 показано условное изменение формы отверстия по передней опору.

С целью снижения влияния температуры на анизотропию упругих свойств опор разработан способ компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков и устройство, его реализующее. Получен патент. Слайд 22.

Анизотропные упругие характеристики опор влияют не только на траекторию движения переднего конца шпинделя, но и на динамические характеристики шпиндельных узлов.

Для исследования влияния анизотропии упругих характеристик опор с различной ориентацией осей жесткости на собственные частоты ШУ можно использовать одномассовую модель, учитывающую усредненный диаметр тела шпинделя.

Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить величины частот собственных изгибных колебаний шпинделя с учетом массы и собственной жесткости шпинделя, расположения центра масс шпинделя, межопорного расстояния, анизотропии жесткости передней и задней опор, а также взаимной ориентации голографов жесткостей опор друг относительно друга. Слайд 23.

Учет указанных факторов, на примере четырех расчетных моделей шпиндельного узла станка модели 16Б16Т1 (слайд 24), позволил выявить диапазон собственных изгибных частот, который значительно возрастает при смещении центра тяжести к передней опоре и увеличении массы шпинделя. Слайд 25.

Анализ динамических характеристик с учетом распределения масс по телу шпинделя удобнее проводить с использованием методов численного моделирования.

На основе модального анализа для четырех расчетных схем шпиндельного узла станка модели 16Б16Т1 (слайд 26) проведена оценка изменения диапазонов собственных частот для каждой формы колебаний при изменении жесткости опор. Слайд 27.

Анализ результатов моделирования показал, что технологическая оснастка (центр и патрон), существенно влияет на формы колебаний и собственные частоты шпиндельного узла. При наличии анизотропии, возможно изменение собственной частоты и формы колебаний. Подтверждено, что наличие анизотропии опор приводит к появлению диапазона собственных частот колебаний шпинделя. Слайд 28.

Для оценки величины анизотропии были проведены экспериментальные исследования на шпиндельных узлах станков токарной группы моделей

16Б16КП, Вектор и 16Б16Т1. Для этого было разработано и изготовлено нагрузочное устройство, реализующее нагружение шпинделя в произвольном радиальном направлении и использующее при этом конструктивные особенности шпиндельного узла. Данное устройство просто по своей конструкции и позволяет проводить замеры в производственных условиях, и не требует исключения станка из технологического процесса. Слайд 29.

С использованием указанного устройства получены данные и построены годографы упругих перемещений передней опоры шпиндельных узлов, экспериментально подтвердившие наличие анизотропии. При этом величина анизотропии составляла от 8 до 16. Слайд 30.

С использованием указанного устройства и предложенной методики измерений оценено влияние температурного фактора на анизотропию жесткости опор шпиндельного узла. Экспериментально установлено, что, при нагреве, вследствие увеличения температуры упругие перемещения в опоре увеличиваются в среднем в два раза с формированием годографа с формой близкой к овалу, с соотношением осей 2:1, и величиной анизотропии 2...2,5, что совпадает с результатами численного моделирования. Слайд 31.

На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по обеспечению изотропных упругих характеристик шпиндельных опор при проектировании (слайды 32-33) и сборке (слайд 34).

Основные выводы по работе представлены на слайдах 35 – 38. Доклад окончен.

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

Спасибо, спасибо. Так, вопросы, пожалуйста. Прошу задавать.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Скажите пожалуйста, структурно-параметрическая модель на плакате десять, как она получена?

Соискатель Якимов М. В.

Структурно-параметрическая модель получена на основе известных данных, отражающих конструкцию подшипниковой опоры. В модели показаны жесткости или податливости...

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Так модель известна?

Соискатель Якимов М. В.

В какой-то мере – да.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Скажите, класс точности станка влияет на результаты работы?

Соискатель Якимов М. В.

Конечно, класс точности влияет. Было уже схожее замечание в отзывах на автореферат. Анизотропия жесткости наиболее актуальна для станков класса точности П и выше. У станков нормального класса точности погрешности, заложенные при изготовлении станка нивелируют величину анизотропии жесткости.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Регрессионные зависимости, представленные на плакате четырнадцать, где в дальнейшем использовались? И на практике их как-то использовать можно?

Соискатель Якимов М. В.

Идея заключается в том, что при конечно-элементном моделировании можно представлять подшипник не полностью: тела качения, кольца, а в виде сплошного кольца, которое должно обладать упругими характеристиками, аналогичным упругим характеристикам подшипника. Если подбирать свойства материала, а это шесть модулей упругости методом перебора, то это очень трудоемко. По представленному регрессионному уравнению модули упругости можно определить достаточно легко, зная значения перемещений в опоре, которые мы хотим получить.

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

Михаил Владимирович, если я правильно понял вопрос Вячеслава Викторовича, то, вот вы получили модель и где вы потом ее использовали?

Соискатель Якимов М. В.

Указанная модель опоры в частности использовалась при модальном анализе шпиндельного узла. В моделях шпиндельных узлов, показанных на слайде, подшипники представлены в виде колец с определенными упругими свойствами.

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

То есть использованы те модели, про которые вы ранее говорили?

Соискатель Якимов М. В.

Да, здесь использованы эти модели.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Какие подшипники вами исследовались?

Соискатель Якимов М. В.

Указанное регрессионное уравнение получено для роликового двухрядного конического подшипника с переменным шагом тел качения. Также имеет уравнение для подшипника задней опоры – роликового однорядного.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Как учтены смазочные материалы подшипника?

Соискатель Якимов М. В.

В указанных моделях смазочные материалы не учитываются.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Смазочные материалы значительно влияют и во всех станках применяются.

Соискатель Якимов М. В.

Разработанные модели учитывают только упругие свойства опор.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Где у вас представлены технологические исследования влияния упругих перемещений на точность обработки?

Соискатель Якимов М. В.

Такая задача не ставилась. Оценивалась точность станка.

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

Есть еще вопросы? Да, Евгений Михайлович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е.М.

Вот у вас на слайде 31 рассмотрено влияние температуры на анизотропию жесткости опор. Как вы преодолеваете явление анизотропии жесткости?

Соискатель Якимов М. В.

Разработаны рекомендации, которые представлены на отдельном слайде. Максимального эффекта по снижению анизотропии можно добиться только на этапе проектирования, либо с использованием способа, представленного в нашем патенте.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е.М.

Я понимаю, вы хотите сказать, что можно обеспечить определенный зазор в сопряжении. Но я говорю о другом, на практике, в работающем станке что можно сделать, чтобы преодолеть явление анизотропии? Почему у вас возникает такая анизотропия? Почему такое неравномерное температурное расширение? Наверное, трение где-то больше? Температура выше, поэтому и возникают деформации.

Соискатель Якимов М. В.

Для снижения температурных деформаций можно попытаться обеспечить принудительное охлаждение или изменить условия смазки.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е.М.

Но ведь можно было форму корпуса заранее изменить.

Соискатель Якимов М. В.

Да, это можно было сделать на этапе проектирования, но не на работающем станке.

Д-р техн. наук, доцент Булыжев Е.М.

У меня нет больше вопросов.

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

Да, Александр Николаевич, пожалуйста.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Можно десятый слайд открыть? Вы представили структурно-параметрическую модель, учитывающую множество факторов. Все ли из этих факторов вы учли? Или какие-то факторы оказали незначимыми?

Соискатель Якимов М. В.

Мы попытались разбить указанные факторы на группы. На первом этапе выполнялась оценка влияния погрешностей посадочных поверхностей на анизотропию жесткости опоры. В дальнейшем учитывались контактные явления между телами качения и кольцами, а также деформации колец. Нами ставилась цель по возможности учесть максимальное число факторов, влияющих на анизотропию упругих свойств опоры.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Какие из факторов оказались наиболее значимые? Что вы учли и что не учли?

Соискатель Якимов М. В.

Я считаю, что мы учли в модели все факторы. Я не могу сказать какие из факторов менее или более значимые. Жесткость подшипника рассчитывалась по аналитическим зависимостям, там учитывалось большинство этих факторов.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Факторы, представленные в модели, вы учитывали при конечно-элементном моделировании?

Соискатель Якимов М. В.

Да.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Как Вы с помощью конечно-элементного моделирования учитывали податливость стыка соединения?

Соискатель Якимов М. В.

Стык можно учесть контактными парами, но это не всегда реализуемо.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Вы это делали или нет?

Соискатель Якимов М. В.

Контактные явления были заложены в упругие свойства кольца, моделирующего подшипник. Были учтены все контактные деформации, деформации колец и тел качения, таким образом, получена упруго-деформационная модель, учитывающая все факторы.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Модель учитывала, например, шероховатость?

Соискатель Якимов М. В.

Нет, параметры шероховатости не учитывались. Модель учитывала только жесткость или податливость элементов, входящих в конструкцию подшипниковой опоры. В модели реализован учет точности изготовления посадочных поверхностей.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Параметр шероховатости оказывает основное влияние на контактную жесткость.

Соискатель Якимов М. В.

Я согласен.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Можно открыть шестнадцатый слайд? В секторной модели в каком сочетании принимались различные модули упругости? Случайным образом или по какому-то закону?

Соискатель Якимов М. В.

На основе регрессионного уравнения, полученного на предыдущем этапе работы, для конечно-элементной модели идеальной опоры получены значения модулей упругости. Отталкиваясь от номинальных значений модулей упругости, мы можем заложить увеличение податливости в процентном

соотношении, и, тем самым, смоделировать анизотропные упругие характеристики опоры.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

По какому-то закону или случайно?

Соискатель Якимов М. В.

Мы принимали изменение жесткости опоры в процентах от номинальной.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Хорошо. Еще по двадцатому слайду вопрос. Я не совсем понял заголовок, вот тут написано: «Определение влияния силовых и температурных факторов на погрешность формы отверстия». Вы имеете в виду при изготовлении отверстия?

Соискатель Якимов М. В.

Имеются в виду, погрешности, заложенные на этапе проектирования, исходя из особенностей конструкции того или иного корпуса. Проблема рассматривается не с точки зрения технологии изготовления, а с точки зрения конструкции.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

То есть рассматривается погрешности формы отверстия с точки зрения конструкции. Вы с помощью САЕ-системы оценивали деформацию отверстия?

Соискатель Якимов М. В.

Да, при моделировании, в зависимости от конструкции корпуса. определялось как изменяется форма отверстия под опору.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Температуру, как вы сказали, вы брали из экспериментов?

Соискатель Якимов М. В.

Да, я провел эксперименты, получил значения температуры в зоне передней опоры, в дальнейшем использовал эти данные при моделировании упругих температурных деформаций корпуса.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Вы задавали температурное поле?

Соискатель Якимов М. В.

Да. Значения температуры задавалось в определенных точках модели, соответствующих точкам замера температуры при эксперименте.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Во многих точках определялась температура при эксперименте?

Соискатель Якимов М. В.

Число точек было максимально возможным.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Вы выполняли моделирование при различных температурах, различных конструкциях?

Соискатель Якимов М. В.

Нет, моделирование выполнялось для одного случая.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

То есть обобщить это нельзя на различные конструкции шпиндельных узлов?

Соискатель Якимов М. В.

Результаты можно распространить на корпуса схожей формы и размеров. Но данное моделирование выполнялось для определенной конструкции корпуса шпиндельного узла.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Понятно. Рассмотрен частный случай.

Соискатель Якимов М. В.

Да.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

У меня все.

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

Так, еще кто? Николай Васильевич?

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Михаил Владимирович, скажите пожалуйста, на слайде 5 «Схема образования овальности» - это схема показывает форму отверстия при растачивании или после?

Соискатель Якимов М. В.

Зависимость и схема отражают овальность отверстия после растачивания.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Вот тогда и следовало назвать данную схему «Схема образования овальности после растачивания».

Второй вопрос. Слайд 11. Что за параметр – «направление действия силы»? Вы построили график в зависимости от направления действия силы.

Соискатель Якимов М. В.

Направление действия силы связано с расчетной схемой, показанной на слайде десять, и соответствует направлению осей X и Y, определяемых расположением осей эллипса отклонения от круглости.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Это два направления силы, величину которой вы меняете?

Соискатель Якимов М. В.

При моделировании изменялись величины силы, действующей по оси X и Y, а также величина отклонения от круглости.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Все ясно. Еще один вопрос. Величина анизотропии в чем измеряется?

Соискатель Якимов М. В.

Это безразмерная величина, которая определяется отношением максимальных упругих перемещений к минимальным.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Все, вопросов больше нет.

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

Еще вопросы? Есть вопросы у членов совета, кто участвует дистанционно? Леонид Викторович Худобин, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Михаил Владимирович, два вопроса. Первый вопрос. Скажите пожалуйста, как понимать выражение, которое вы использовали, «отверстие перемещается»? Куда может перемещаться отверстие? Это не материальный объект.

Соискатель Якимов М. В.

При численном моделировании результаты были представлены как перемещения точек, лежащих на поверхности отверстия под подшипник.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Но само отверстие никуда перемещаться не может?

Соискатель Якимов М. В.

Я согласен, отверстие изменяет свою форму, но не перемещается.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Хорошо. Второй вопрос. Скажите, пожалуйста, во все опорах шпинделей, которыми Вы занимались, входят подшипники качения. Какая из деталей подшипника или какой фактор является доминирующим в явлении анизотропии. Какая из деталей, входящая в состав конструкции опоры, является доминирующей с точки зрения величины анизотропии.

Соискатель Якимов М. В.

Я считаю, что это кольца подшипника и их деформация. И стыки между корпусом и наружным кольцом, а также валом и внутренним кольцом.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Если это доминирующий фактор, то как вы предлагаете бороться с явлением анизотропии?

Соискатель Якимов М. В.

С этим сложно бороться в связи с особенностями конструкции подшипника. Можно повышать требования к точности посадочных поверхностей.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Что значит «особенности конструкции подшипника»? Что имеется в виду?

Соискатель Якимов М. В.

Я имею в виду наличие тел качения и деформации колес в местах контакта, появление отклонений от круглости дорожек качения. С этим бороться сложно. Можно влиять на точность изготовления отверстий под подшипники и конструкцию корпусов.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Насколько я понял из изучения автореферата вашей диссертации, подшипник подбирается по грузоподъемности? Да?

Соискатель Якимов М. В.

Да.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Скажите, пожалуйста, как Вы думаете, количество и расположение тел качения оказывают влияние на смещение оси шпинделя?

Соискатель Якимов М. В.

Да, конечно влияет. Современные шариковые подшипники имеют увеличенное число тел качения и за счет этого жесткость будет существенно выше.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Таким образом, подшипник должен иметь максимально возможное количество тел качения, так?

Соискатель Якимов М. В.

Как одно из средств снижения величины смещения оси шпинделя – да.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

Спасибо.

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

Так, еще вопросы, пожалуйста. Николай Иванович Веткасов, пожалуйста.

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

Скажите пожалуйста, вот у вас название диссертации «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор», изотропные упругие характеристики на сто процентов обеспечиваются?

Соискатель Якимов М. В.

Стопроцентной изотропности добиться сложно.

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

Тогда может в названии диссертации следовало дать формулировку «... значительное уменьшение анизотропности ...».

Скажите пожалуйста, почему вы проводили свои исследования на станке модели 16Б16КП?

Соискатель Якимов М. В.

Материально-техническая база университета оснащена только этим оборудованием.

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

Указанный станок нормального класса точности?

Соискатель Якимов М. В.

Исследования проводили на трех станках повышенного класса точности: 16Б16КП – универсальный токарно-винторезный станок, Вектор – токарный станок с оперативной системой управления, 16Б16Т1 – токарный станок с ЧПУ.

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

Возможно ли использовать вашу методику на современных станках?

Соискатель Якимов М. В.

Я считаю, что возможно. В ходе выполненного численного моделирования различных конструкций корпусов, подтверждено, что результаты работы

могут быть распространены на современные станки, в том числе и на станки другой группы, например, расточные. Мои исследования проводились на примере станков токарной группы.

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

Так, Евгений Степанович Киселев, пожалуйста.

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

Двадцать девятый слайд, пожалуйста. На слайде показана экспериментальная установка, нагрузку вы даете, имитируя процесс расточки?

Соискатель Якимов М. В.

При нагружении шпинделя устройство устанавливается в пиноль задней бабки. В дальнейшем путем осевого перемещения пиноли сферическая опора устройства скользит по внутренней конической поверхности шпинделя, за счет чего происходит нагружение радиальной силой.

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

Хорошо. Другие нагрузки влияют на упругие перемещения шпинделя, в вашей конструктивной схеме? Или все ограничивается только такого вида нагрузками?

Соискатель Якимов М. В.

Я рассматривал только радиальную нагрузку.

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

На сколько это обосновано? В конструкции шпинделя имеются шестерни, которые передают вращение на шпиндель. Это тоже силовая нагрузка. Вы почему-то ее исключили. Почему? На каком основании? Есть какие-то на этот счет соображения, что той нагрузкой можно пренебречь?

Соискатель Якимов М. В.

С использованием указанной установки оценивалась только радиальная жесткость передней опоры шпиндельного узла.

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

Тогда должны быть обоснованы допущения, в которых указывается, что другие нагрузки практически не оказывают влияния на жесткость шпиндельного узла.

Соискатель Якимов М. В.

При использовании нагрузочного устройства направление действия силы менялось, тем самым учитывались нагрузки, в том числе и от зубчатого зацепления.

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

Нагрузочным устройством вы изменяли направление силы P_y . За счет конусной поверхности выполнялось нагружение силой P_y . Изменяли ли вы число оборотов шпинделя?

Соискатель Якимов Михаил Владимирович.

Эксперимент проводили без вращения шпинделя. Направление действия радиальной силы обеспечивается поворотом нагрузочного устройства на определенный угол.

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

Я не могу сказать, как это можно реализовать. Следующий вопрос, на каком основании вы так уверенно Николаю Ивановичу отвечаете, что на современных станках имеет место явление анизотропии жесткости шпиндельного узла? В современных станках нет осевых нагрузок, в конструкции используется мотор-шпиндель, верхняя граница диапазона скоростей достигает вращения шпинделя достигает 40000 об/мин, а иногда и до 90000 об/мин.

Соискатель Якимов М. В.

При таких частотах вращения шпинделя величина силы дисбаланса будет существенно больше.

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

Таким образом, прежде чем так уверенно отвечать на вопрос Николая Ивановича, надо оценивать перечисленные мной моменты. Я бы на Вашем месте не стал бы утверждать, что результаты работы применимы на современных

станках. Мы задавали вам на эту тему вопросы, при предварительном обсуждении диссертации.

Соискатель Якимов М. В.

Я считаю, что результаты моей работы применимы на современных станках.

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

Но результаты работы требуют проверки на современных станках.

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

Предлагаемые вами методики должны быть обоснованы. Я не верю этому.

Соискатель Якимов М. В.

Я согласен, что результаты работы должны быть апробированы на современных станках.

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

Конечно нужно апробировать, и отвечать так уверенно нельзя. Пока ограничимся старыми станками, в конструкции привода главного движения которых применяются коробки скоростей и скоростью вращения шпинделя до 2500 об/мин.

Соискатель Якимов М. В.

В ходе численного моделирования были получены результаты для корпусов шпиндельных узлов станков, не имеющих коробок скоростей.

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

Покажите эти результаты.

Соискатель Якимов М. В.

На слайде девятнадцать представлены геометрические модели корпусов шпиндельных узлов станков с раздельным приводом главного движения.

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

Здесь не указаны направления действующих нагрузок, представлены только корпуса без учета вариантов силового нагружения.

Соискатель Якимов М. В.

В ходе моделирования направление действующей на корпус нагрузки менялось, на основании чего построены годографы упругих перемещений. При этом необязательно наличие указанной нагрузки в реальной конструкции шпиндельного узла.

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

Покажите годограф для случая, когда нет действующей нагрузки.

Соискатель Якимов М. В.

Годограф строится для случая, когда нагрузка действует одновременно во всех направлениях.

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

Звучит неубедительно. Вы сами сказали, что имеет место действие силы дисбаланса. Возникает совсем другая картина. Спасибо.

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

Еще есть вопросы?

Скажите пожалуйста, похожий вопрос уже задавал Александр Николаевич, назовите силовые и температурные факторы, о которых идет речь?

Соискатель Якимов М. В.

Силовые факторы - это сила дисбаланса, температурные факторы – температура от нагрева опоры.

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

Хорошо, понятно. Последний вопрос. Какое повышение точности может быть получено по вашей методике? Вы можете сказать в цифрах?

Соискатель Якимов М. В.

Оценивая точность шпиндельного узла через радиальное биение, можно утверждать, что снижение анизотропии жесткости позволит добиться уменьшения радиального биения на величину до 30%.

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

Вопросы есть еще? Тогда пожалуйста присаживайтесь. Перерыв не будем делать? Тогда слово предоставляется научному руководителю, доктору технических наук, профессору Денисенко Александру Фёдоровичу.

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

Уважаемые коллеги! Сегодня мы слушаем работу, которая началась достаточно давно. Если вы посмотрите, то первая публикация, представленная на эту тему, датирована 2009 годом, и с той поры Михаил Владимирович занимался этой проблемой. Да, по времени это, наверное, достаточно затянулось и можно было бы это сделать раньше, но вот и важность этого вопроса, и сложность этого вопроса как раз говорит о том, что только сейчас можно было как-то обобщить весь материал. Если говорить о том, как Михаил Владимирович прошел этот путь, наверное, следует отметить, что он закончил в 2007 года Самарский государственный технический университет с отличием. Прошел весь этот путь, работая ведущим инженером и старшим преподавателем на кафедре машиностроительного факультета и в итоге за это время он прекрасно освоил программы, связанные с численным моделированием, освоил вопросы работы и программирования на станках программным управлением. То, чем завершилась эта работа, мы сегодня слышали, и это вылилось в те публикации, которые сегодня уже объявлялись, в авторское свидетельство и на данный момент я считаю, что Михаил Владимирович справился с этой поставленной перед собой задачей, и показал себя при этом самостоятельным, творческим научным работником, целеустремленным исследователем, который способен уже на данном этапе самостоятельно и ставить, и, наверное, решать вопросы по развитию своего направления, своей темы. Поэтому, наверное, если мы сегодня проголосуем положительно, то таким образом, мы дадим ему возможность продолжать двигаться в этом направлении. Я считаю, что он является уже на данный момент сформировавшимся научным работником и может решать поставленные перед собой задачи.

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

Спасибо, Александр Федорович, спасибо.

Слово предоставляется Николаю Ивановичу Веткасову для оглашения заключения организации и отзыва ведущей организации.

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

В диссертационный совет поступило заключение Самарского государственного технического университета по диссертации Михаила Владимировича Якимова на тему «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук. В заключении отмечается, что в период подготовки диссертации соискатель Якимов Михаил Владимирович работал в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет» в должностях ведущего инженера, по совместительству старшего преподавателя.

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».

В заключении подтверждается актуальность работы, определяемая тем, что на долю шпиндельного узла (ШУ) приходится от 50 до 80% погрешностей в общем балансе точности станка. Точность шпиндельного узла определяется геометрической точностью изготовления и сборки элементов конструкции и точностью вращения под действием силовых факторов.

Отмечается то, что повышение требований к точности металлорежущих станков вызывает необходимость принимать во внимание обеспечение стабильности жесткостных характеристик в пространстве и при изменении температуры, связанной с эксплуатацией оборудования.

Однако, отсутствие достаточных результатов в изучении формирования анизотропии опор не дает возможности разрабатывать модели ШУ с учетом этого фактора и вырабатывать мероприятия по снижению его влияния на точностные характеристики шпиндельного узла. Таким образом, задача по разработке обоснованных методик прогнозируемого обеспечения изотропных упругих характеристик шпиндельных узлов является актуальной.

Отмечается степень достоверности изложенных в работе результатов обеспечиваемая: обоснованным изучением достаточного объема научной литературы, корректностью поставленной задачи, корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез и подтверждается согласованностью теоретических выводов и данных моделирования с результатами их экспериментальной проверки.

Отмечается научная новизна полученных в диссертации результатов теоретических и экспериментальных исследований, обусловленная рядом научных положений и выводов:

1. Раскрытием закономерностей формирования анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов и получении регрессионной зависимости упругих перемещений опоры на основе проведения полных факторных экспериментов;
2. Разработкой математической модели изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками;
3. Анализом влияния температурного фактора на характер анизотропии податливости опор;
4. Раскрытием закономерностей влияния жесткости опор, элементов конструкции ШУ и частоты вращения шпинделя на собственные частоты и формы колебаний.

Отмечается практическая ценность диссертационной работы, определяемая:

1. Обоснованными рекомендациями по снижению анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов;

2. Разработкой конструкции устройства для измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка в производственных условиях и методики проведения исследований и обработки результатов;

3. Разработкой нового способа компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков и устройства, его реализующего.

Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению в виде методик учета влияния погрешностей изготовления и сборки на упругие деформации шпиндельного узла на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средневолжского станкозавода» (г. Самара) и ООО Научно-производственное объединение «РОСИНМАШ», а также использованы при подготовке бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ.

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на 8-ми международных и всероссийских научно-технических конференциях. Материалы диссертации отражены в 23 печатных трудах, в том числе 9 статьях в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 2 статьях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и 1 патенте РФ.

Основные публикации по теме диссертации приведены в отзыве на диссертацию.

И, в конце заключения, приводится вывод о соответствии диссертации паспорту научной специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)». Диссертация соответствует пунктам области исследования №1 (Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компо-

нентов (приспособлений, гидравлических узлов и т.д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий.), №5 (Создание, включая исследования, проектирование, расчеты, комплектующих агрегатов и механизмов, обеспечивающих достижение требуемых технологических и технико-экономических параметров оборудования).

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

Присутствовали на заседании 10 сотрудников СамГТУ, в том числе 6 докторов технических наук. Результаты голосования: «за» - 10 человек, «против» - нет, «воздержались» - нет. Протокол заседания № 3 от «12» октября 2021 г.

Отзыв подписан Гришиным к.т.н., доцентом, заведующим кафедрой «Технология машиностроения, станки и инструменты» СамГТУ и утвержден первым проректором по научной работе СамГТУ д.т.н., профессор Ненашевым М.В.

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

Отзыв ведущей организации.

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

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет».

В отзыве отмечается актуальность темы диссертационной работы.

Работа посвящена решению актуальной проблемы повышение точности шпиндельного узла путем снижения анизотропии жесткостных характеристик опор

Точность станка определяется факторами, непосредственно связанными с формообразующими подсистемами, среди которых шпиндельный узел (ШУ) играет наиболее существенную роль. Точность металлорежущего оборудования непрерывно повышается, в тоже время обеспечение высоких точностных

характеристик дополняется требованием постоянства точности как во времени, так и в пространстве. Данное обстоятельство наиболее актуально для станков с числовым программным управлением, обработка на которых характеризуется изменением направления силовых факторов в зоне резания. Также стоит отметить, что с интенсификацией режимов резания при обработке, возрастают требования к характеристикам металлорежущих на холостом ходу. Жесткость шпиндельного узла металлорежущего станка является основной характеристикой, определяющей его точность.

Точность шпиндельного узла зависит от двух факторов: геометрической точности изготовления и сборки элементов опор и точности вращения под действием силовых факторов. Геометрическая точность ШУ характеризуется радиальным и осевым биениями, и закладывается на этапе проектирования. Точность вращения шпинделя под действием силовых факторов зависит от природы возникновения нагрузки. К внутренним силовым факторам относится центробежная сила, возникающая вследствие наличия дисбаланса тела шпинделя и конструктивных элементов, установленных на нем.

Во время вращения центр шпинделя описывает траекторию, форма которой зависит от двух взаимосвязанных параметров: геометрической точности элементов конструкции и упругих характеристик опор. В свою очередь, жесткость опор в большинстве случаев имеет ярко выраженную анизотропию, то есть непостоянство при различных направлениях действия силы. При таких условиях траектория движения центра шпинделя существенно отличается от окружности, что вносит дополнительные погрешности в точность шпиндельного узла. Также стоит отметить, что обеспечение стабильности точностных характеристик металлорежущих станков вызывает необходимость учитывать постоянство жесткости ШУ в пространстве и при изменении температуры.

Однако, отсутствие достаточных результатов в изучении формирования анизотропии опор не дает возможности разрабатывать мероприятия по обес-

печению изотропных упругих характеристик опор с целью повышения точности шпиндельных узлов. Таким образом, диссертационная работа Якимова Михаила Владимировича является актуальной.

Диссертация выполнена на базе Самарского государственного технического университета и состоит из введения, шести глав, общих выводов по работе, списка использованных источников и приложений. Основное содержание работы изложено на 182 страницах, включая 147 рисунков и 19 таблиц в тексте.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1. Раскрыты закономерности формирования анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов и получены регрессионные зависимости упругих перемещений опоры на основе проведения полных факторных экспериментов;

2. Разработана математическая модель изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками;

3. Установлено влияние температурного фактора на характер анизотропии податливости опор;

4. Раскрыты закономерности влияния жесткости опор, элементов конструкции ШУ и частоты вращения шпинделя на собственные частоты и формы колебаний.

Отмечается степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Отражено соответствие диссертации автореферату и паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки) по пунктам 1, 5 «Области исследований» как по общему содержанию материалов, так и по теоретическим и практическим методикам исследований.

Автореферат диссертационной работы полностью отражает содержание, результаты, положения и полученные выводы работы.

Отмечается практическая значимость разработок соискателя, в частности:

1. Сформулированы обоснованные рекомендации по снижению анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов;
2. Разработана конструкция устройства для измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка в производственных условиях и методика проведения исследований и обработки результатов;
3. Разработан новый способ компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков и устройства, его реализующего.

Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению в виде методик учета влияния погрешностей изготовления и сборки на упругие деформации шпиндельного узла на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средневолжского станкозавода» (г. Самара) и ООО Научно-производственное объединение «РОСИНМАШ», а также использованы при подготовке бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ.

По теме работы опубликовано 23 печатных труда, в том числе 9 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и 1 патент РФ.

В заключении содержатся рекомендации по внедрению результатов и выводов, приведенных в диссертации. Результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, могут быть использованы на машиностроительных предприятиях, специализирующихся на изготовлении, модернизации и ремонте станочного оборудования. Проведенные Якимовым

М.В. теоретические и экспериментальные исследования позволили сформулировать рекомендации по обеспечению изотропных упругих характеристик опор шпинделя, реализуемые при проектировании и сборке ШУ.

Замечания по диссертационной работе

1. Модель опоры качения, описанная в главе 3, обладает линейными упругими свойствами, что не полностью отражает жесткостные характеристики подшипников качения.

2. Не указано проводилась ли апробация способа компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков, описанного в главе 4.

3. В диссертации отсутствуют фотографии натурных и стендовых испытаний.

4. В работе использована геометрическая модель точности, что в неполной степени отражает физику процесса.

5. В главе 6 недостаточно внимания уделено статистической обработке экспериментальных данных.

6. Эксперименты, описанные в главе 6, проводились на станках токарной группы. Представляет интерес выполнение указанных исследований на станках других групп, в частности координатно-расточных.

В целом, отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы Якимова Михаила Владимировича.

Несмотря на отмеченные выше замечания, не снижающие ценность работы, диссертация Якимова Михаила Владимировича на тему: «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение задачи повышения точности вращения шпиндельных узлов путем снижения анизотропии упругих характеристик шпиндельных опор на основе соблюдения обоснованных рекомендаций на этапах проектирования и сборки. Работа выполнена на достаточном научно-теоретическом уровне,

методики и средства выполненных исследований соответствуют решаемым задачам.

На основании изложенного, учитывая актуальность работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также уровень и объем выполненных исследований, рассмотренная диссертация на тему «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор» удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Якимов Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на расширенном заседании кафедры технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов ФГБОУ ВО «Оренбургского государственного университета» протокол №5 от 6.12.2021.

Отзыв подписал заведующий кафедрой технологии машиностроения, металлообрабатывающих станков и комплексов, д.т.н., профессор А.Н. Поляков. Отзыв утвержден проректором по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургского государственного университета», д.ф.-м. наук, профессором Летутой С.Н.

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

Так, теперь по отзывам на автореферат. На автореферат диссертации поступило пятнадцать отзывов, все они положительные. Наверное, как и в предыдущем случае, есть предложение сделать обзор замечаний, представленных в отзывах. И, второе, так как обзор замечаний и ответы на них у каждого члена совета имеются, есть предложение сразу послушать соискателя по этим

замечаниям. Нет возражений? Нет. Только у меня просьба к вам, Михаил Владимирович. Я ознакомился с вашими ответами на замечания, вы разбиваете их на четыре группы?

Соискатель Якимов М. В.

Да, совершенно верно.

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

И я вижу, что у большинства замечаний стоит последняя группа - четвертая. Вы собираетесь отвечать на каждое замечание?

Соискатель Якимов М. В.

Да.

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

Я посмотрел замечания, например, вопрос такой: «Несоответствие наименования осей в расчетах, представленных в главе пять». Наверное, стоит согласиться?

Соискатель Якимов М. В.

Я так и написал.

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

Но вы начинаете комментировать.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Комментировать не надо.

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

Посмотрите еще раз замечания и ответьте только на те, на которые действительно требуется ответ, как Вы считаете правильным. А там, где вы соглашаетесь с рецензентом, отвечать, наверное, не стоит. Комментарии к замечаниям достаточно полно изложены в тексте диссертации. Пожалуйста. Сначала ответы на замечания ведущей организации.

Соискатель Якимов М. В.

Ответы на замечания ведущей организации.

Ответ на первое замечание.

Полученная регрессионная модель, отражающая упругие свойства КЭ-модели опоры, показала достаточную сходимость, по этой причине мы ограничились линейной моделью с взаимодействиями.

Ответ на второе замечание.

С замечанием согласен. Апробация не проводилась.

Ответ на третье замечание.

С замечанием согласен. Фотографии имеются, но мы ограничились в тексте диссертации чертежами и схемами.

Ответ на четвертое замечание.

С замечанием согласен. В работе рассматривается только геометрические параметры точности шпиндельного узла – траектория оси шпинделя и радиальное биение как основная характеристика.

Ответ на пятое замечание.

С замечанием согласен. При выполнении экспериментов каждый замер повторялся от 3 до 6 раз, далее находилось среднее значение. Дальнейшей обработки экспериментальных данных не производилось, так как разброс полученных значений был невелик.

Ответ на шестое замечание.

С пожеланием согласен. В настоящее время отсутствует возможность проведения таких исследований на действующем оборудовании указанной конструкции.

Отвечил на все замечания ведущей организации.

Ответы на замечания по автореферату.

Замечания на автореферат были разбиты на четыре группы в зависимости от характера ответа на них. Четвертая группа замечаний – это те замечания, на которые я хотел бы дать пояснения.

Первое замечание Попова Андрея Юрьевича:

Испытания или расчеты для шпинделей с наклонным расположением оси вращения не проводились. Влияние износа подшипников на точность узла не учитывалось.

На второе замечание ответ был уже дан в ответах на замечания ведущей организации.

Третье замечание. В главе 5 представлена аналитическая модель, расположение осей принято, исходя из удобства интерпретации результатов.

Замечания Яресько Сергея Игоревича.

На первое замечание ответ был дан в докладе.

Второе замечание. При моделировании влияния температуры на упругие характеристики шпиндельных опор, диапазон изменения температуры принимался на основе полученных нами экспериментальных данных.

Замечания Трушина Николая Николаевича.

Влияние дополнительных отверстий в корпусе не является столь очевидным так как необходимо учитывать не только их размеры, но и координаты расположения. Подробнее эти условия представлены в диссертации.

Третье замечание. При условии разработки структурно-параметрической модели опоры скольжения выполненные разработки могут быть перенесены на ШУ, использующие данный тип опор.

Шестое замечание. Рассмотренные в работе способы снижения анизотропии целесообразны для серийных станков класса П и выше. Для станков нормальной точности изменение траектории вращения шпинделя вследствие анизотропии жесткости опор будет незначительно на фоне погрешностей, определяемых классом точности станка.

Замечания Хаймовича Александра Исааковича.

Первое замечание. Расчет проводился для корпуса ШУ призматической формы, на примере станка модели 16Б16Т1.

Второе замечание. Пояснения по проверке адекватности прозвучали в ответе на замечание Яресько С.И.

Замечания Курзакова Андрея Сергеевича.

В работе величина анизотропии, оцениваемая отношением максимальных упругих перемещений опоры к минимальным и измеряемая в безразмерных единицах, дополняется годографом, что позволяет оценить величину упругих перемещений.

Замечания Вартанова Михаила Владимировича.

Задача по технологической реализации способа совмещения контуров деталей с учетом их пространственных погрешностей при сборке подшипниковых узлов в работе не ставилась.

Второе замечание. В представленных в работе исследованиях дисбаланс шпинделя принимался по максимальному классу балансировки $G0,4$, предполагающему минимальный собственный дисбаланс шпинделя.

Замечания Зверовщикова Александра Евгеньевича.

Первое замечание. Упругие характеристики модели КЭ-модели опоры определялись по известным зависимостям, учитывающим преднатяг и нелинейность контакта в сопряжениях подшипника с валом и корпусом.

Третье замечание. Одномассовая схема расчета шпинделя позволяет оценить влияния анизотропии упругих характеристик опор с различной ориентацией осей жесткости на собственные частоты ШУ. Анализ динамических характеристик с учетом распределения масс по длине шпинделя удобнее осуществлять с использованием возможностей численного моделирования.

Замечания Шапошникова Александра Михайловича и Порсева Кирилла Игоревича.

Тип подшипника влияет на жесткость опоры и не оказывает влияния на величину анизотропии.

Замечания Короткова Александра Николаевича.

Первое замечание. Наличие инструмента или заготовки оказывает существенное влияние на точность вращения шпинделя, однако в поставленных в работе задачах оценивалась точность станка без учета оснастки.

Ответил на все замечания по автореферату.

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

Так, хорошо. Начинаем обсуждать диссертацию. Слово предоставляется официальному оппоненту д.т.н., профессору Сабирову Фану Сагировичу. Пожалуйста.

Официальный оппонент д-р техн. наук, профессор Сабиров Ф.С.

Спасибо, коллеги. Требования к точности обработки на металлорежущих станках постоянно растут. Шпиндельные узлы станков являются одними из основных узлов, которые формируют погрешности обработки и определяют эксплуатационный ресурс оборудования. Точность шпиндельного узла определяется точностью изготовления и сборки элементов конструкции и точностью вращения под действием силовых нагрузок. Анизотропия жесткости шпиндельного узла может оказывать существенное влияние на точность обработки и долговечность подшипников, поэтому диссертационная работа Якимова Михаила Владимировича имеет определенную актуальность.

Анализ диссертационной работы показал на логическое изложение материала, правомерность постановки задач, обоснованность используемых методов их решения, выводов и рекомендаций.

Далее в отзыве делаю анализ содержания отдельных глав, но с вашего позволения я этот раздел отзыва опущу и сразу же перейду к научной новизне, которая заключается в следующем.

Раскрыты закономерности формирования анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов на подшипниках качения и получены регрессионные зависимости упругих перемещений опоры от модулей упругости и модулей сдвига.

Разработана математическая модель изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками.

Показано влияние температурного фактора на характер анизотропии podatливости опор.

И наконец раскрыты закономерности влияния жесткости опор, элементов конструкции шпиндельного узла и частоты вращения шпинделя на собственные частоты и формы колебаний.

На основе представленных исследований даны научно обоснованные рекомендации по повышению точности шпиндельных узлов станков на основе снижения анизотропии жесткостных характеристик опор шпинделей, разработана конструкция устройства для измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка, которую можно применять в производственных условиях, а также разработана методика проведения испытаний и обработки результатов. Разработан способ компенсации деформаций шпиндельного узла из-за тепловых деформаций подшипников шпинделей и устройство, реализующее этот способ, что защищено патентом на изобретение.

Научные и практические результаты по различным разделам диссертации докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции международных, Всероссийских.

Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средневолжского станкозавода» (Самара) и ООО НПО «РОСИНМАШ», а также используются при подготовке бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ. О внедрении результатов диссертационной работы свидетельствуют соответствующие акты.

Автореферат полностью соответствует материалам диссертации и отражает ее основные положения.

Замечания по диссертационной работе.

Не подвергая сомнению результатов работы и выводов, следует отметить следующие замечания и недостатки по работе:

Первое. Анизотропия жесткости исследовалась только на фланце шпинделя. Наличие оснастки (патрон и т.п.) может существенно изменить анизотропию жесткости. Хотелось бы иметь какое-то суждение автора по этому поводу.

Второе. Не проанализирована модель влияния анизотропии жесткости на параметры точности обрабатываемой детали (некруглость, волнистость и т.п.)

Третье замечание. Не освещены вопросы положительного использования анизотропии упругих свойств передней опоры шпинделя за счет определенной ориентации осей жесткости с целью повышения технологической жесткости, как это реализовано в партии токарных станков на заводе «Красный пролетарий». Там за счет эллиптической расточки под передний подшипник добивались того, что перемещение по нормали к обрабатываемой поверхности по оси были минимальны. Таким образом, обеспечивали технологическую жесткость материала.

В разделе 5.3 выполнен расчет собственных частот шпиндельного узла в диапазоне частот вращения 0-20000 об/мин. Однако рассматриваемый токарный станок 16Б16Т1 имеет максимальную частоту вращения 2000 об/мин и с частотой вращения 20000 никогда работать не будет. Поэтому я думаю, особого смысла считать собственные частоты для таких скоростей вращения шпинделя не имеет смысла.

Пятое замечание. Приводится спорное положение на странице 21, что «Шпиндель считается виброустойчивым, если собственная частота шпинделя в опорах больше 250 Гц для станков нормальной точности и больше 500 Гц для станков повышенной точности». Виброустойчивость станка, и шпиндельного узла в частности, как способность вести обработку без потери устойчивости, зависит от динамических характеристик упругой системы и шпиндельного узла, а не от класса точности станка.

В автореферате шифр специальности в автореферате указан не верно 02.05.05 вместо 2.5.5. Новый автореферат был получен уже после отправления

отзыва, поэтому это замечание рассматриваем как техническую ошибку и во внимание ее не принимаем.

В работе есть ряд неудачных терминов, выражений, ошибок, например, на странице 15: «Шпиндель, имеющий дисбаланс приводит к возникновению колебаний». Очевидно, вращение шпинделя приводит к возникновению колебаний. На странице 13 – не указан номер рисунка, на который идет ссылка. На странице 17, рисунок 1.6 – не показана сила резания P . На странице 139, таблица 5.3 – собственные частоты приведены с точностью до 5-ти значащих цифр, тогда как в модели есть упрощения и допущения и значащих цифр при таких расчетах бывает не более 3-х. Кроме того, в диссертации имеются опечатки и стилистические погрешности.

Заключение. Диссертационная работа Якимов Михаила Владимировича является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на хорошем научном уровне.

Содержание, научные и практические решения, полученные в результате исследования, удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» в части, относящейся к кандидатским диссертациям, а ее автор Якимов Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – «Технологии и оборудования механической и физико-технической обработки».

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

Спасибо, Фан Сагирович. Михаил Владимирович, пожалуйста, ответы на замечания оппонента.

Соискатель Якимов М. В.

По первому замечанию. С замечанием согласен. Наличие оснастки приводит к росту действующих внутренних сил, что в свою очередь вызывает увеличение упругих деформаций опоры. Но в моей работе оценивалась точность станка без учета оснастки, и определение ее влияния на анизотропию жёсткости опор будет являться задачей наших последующих исследований.

Второе замечание. Цели по анализу влияния анизотропии жесткости на параметры точности обработки в диссертации не ставилось. Как уже было сказано ранее, в работе рассматривалась только точность станка.

Третье замечание. К сожалению, я не нашел информации касающейся опыта завода «Красный пролетарий» в данном вопросе.

Четвертое замечание. С замечанием согласен, но предполагается, что существуют станки со схожей компоновкой ШУ и большими частотами вращения шпинделя.

Пятое замечание. Так как вибрации оказывают существенное воздействие на точность обработки, то чем выше точность станка, тем большей виброустойчивостью он должен обладать.

Шестое замечание. С замечанием согласен. Имело место техническая ошибка. Ошибка была исправлена и выполнена повторная рассылка автореферата.

По седьмому замечанию полностью со всем согласен.

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

Фан Сагирович, ответы на вопросы вас удовлетворяют?

Официальный оппонент д-р техн. наук, профессор Сабилов Ф.С.

Удовлетворяют. В литературе нет ссылки на книгу В.А. Кудинова «Динамика станков» - основоположника динамики станков. Указанные эксперименты, выполненные на заводе «Красный пролетарий», освещены в этой книге. А именно, ориентация осей жесткости использовалась в положительных целях.

Соискатель Якимов М. В.

Я смотрел эту книгу, но честно не помню данной информации.

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

Спасибо. Слово предоставляется официальному оппоненту к.т.н., доценту Фецаку Сергею Игоревичу. Пожалуйста.

Официальный оппонент к-т техн. наук, доцент Фецак С.И.

Первый оппонент, Фан Сагирович, много, что сказал. Добавлю свои замечания.

Целью данной работы является повышение точности шпиндельного узла путем снижения анизотропии жесткости опор на этапе проектирования и сборки.

Анализ по главам пропущу, в отзыве описан этот анализ более подробно.

В результате выполнения диссертационной работы автором установлено, что анизотропия упругих характеристик подшипников шпиндельных узлов среднего типоразмера при изменении отклонения от круглости посадочных поверхностей увеличивается. Наличие овальности на посадочных поверхностях приводит к деформациям колец подшипников, различным в зависимости от ориентации отклонений от круглости отверстия и вала, что вызывает смещение центра вала после запрессовки.

Разработана упруго-деформационная конечно-элементная модель в виде сплошного кольца с определенными свойствами материала, что дает возможность исключить из использования при проектировании конечно-элементной модели подшипника, отражающие все конструктивные элементы опоры. На основе проведения полного факторного эксперимента для выбора свойств материала конечно-элементной модели получено уравнение регрессии упругих перемещений опоры. На основе модели подшипника в виде сплошного кольца предложена секторная конечно-элементная модель с различными ортотропными упругими свойствами материалов секторов, что дает возможность учесть любую форму анизотропии податливости опор.

Предложена конструкция устройства и методика измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка.

Проведены экспериментальные исследования шпиндельного узла токарного станка среднего типоразмера.

Установлено, что эксплуатация станка сопровождается повышением температуры шпиндельного узла. Это приводит к увеличению упругих перемещений приблизительно в два раза с формированием годографа с четко выраженной овальной формой, с соотношением осей 2:1, и величиной анизотропии 2...2,5.

Проведены численные эксперименты, которые показали, что обеспечение изотропии упругих характеристик при проектировании корпуса шпиндельного узла станков с вертикальной компоновкой шпинделя необходимо учитывать действие центробежной силы от дисбаланса шпинделя, а для станков с горизонтальной компоновкой еще требуется принимать во внимание вес шпинделя. На формирование анизотропии упругих свойств отверстий корпуса под шпиндельные подшипники оказывают влияние такие факторы, как число дополнительных отверстий под валы привода, координаты положения отверстия под опоры шпинделя, толщина стенки и диаметр бобышки под переднюю опору, а также близость расположения дополнительных отверстий к отверстию под шпиндельные подшипники. Выполненные исследования показали, что предпочтение следует отдавать конструкциям корпусов с минимальным числом дополнительных отверстий и максимальным удалением их от шпинделя.

Проведено моделирование температурных полей передней стенки корпуса шпиндельного узла, соответствующих нагреву станка после часа работы. Для компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков предложены способ и устройство для его реализации. Что у соискателя защищено в патенте.

Разработана математическая модель изгибных колебаний шпинделя на опорах с анизотропной упругой характеристикой. Модель учитывает взаимную ориентацию осей жесткости. Получены аналитические зависимости, позволяющие оценить величины частот собственных изгибных колебаний шпинделя с учетом массы и собственной жесткости шпинделя, расположения центра масс шпинделя, межопорного расстояния, анизотропной жесткости опор

шпинделя и взаимной ориентации годографов жесткостей передней и задней опор. Учет указанных факторов приводит к появлению диапазона собственных изгибных частот шпинделя. Автор получил, с использованием модального анализа, результаты для первой и второй форм колебаний шпиндельного узла.

Научная и практическая новизна и значимость автором апробированы и приняты к внедрению на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средневожского станкозавода» и ООО Научно-производственное объединение «РОСИНМАШ», а также на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» Самарского государственного технического университета.

Научные положения, выводы и рекомендации рецензируемой диссертационной работы достаточно обоснованы и достоверны.

Полученные автором результаты базируются на корректном применении методов проектирования шпиндельного узла, технологии машиностроения, теории математического моделирования с использованием численно-аналитических методов и методов математической статистики. Экспериментальные исследования проводились на современных металлорежущих станках с использованием аттестованных измерительных средств и с применением методов численного компьютерного моделирования в среде ANSYS.

По теме диссертации опубликовано двадцать три печатные работы, в том числе девять статей в рецензируемых центральных журналах, входящих в перечень ВАК, один патент и две публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных Scopus.

Замечания.

Первое замечание. Я не могу согласиться с автором, что центробежную силу, возникающую в следствии наличия дисбаланса тела шпинделя и конструктивных элементов, установленных на нем, автор считает внутренним силовым фактором. В работах Левиной З.М., Зверева И.А. и других авторов данная сила относится к внешнему силовому фактору.

Второе замечание. Автор на странице семь утверждает, что «достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях теории проектирования шпиндельного узла...». Вероятно, автор имел в виду методы или алгоритмы проектирования шпиндельного узла.

Третье. В работе встречаются ссылки на рисунки, название которых не соответствует подрисуночным надписям. Например, на странице семнадцать приведена ссылка на рисунок 1.4 - Под действием всего комплекса внешних и внутренних факторов смещения шпинделя проявляются как случайные функции, а рисунок 1.4 имеет подрисуночную надпись: «Формирование центробежной силы роторной системы при наличии дисбаланса». Тоже замечание относится к некоторым таблицам, представленным в работе. Например, на странице 68 в тексте автор обращается к таблице 1, на самом деле он имеет в виду таблицу 3.1. Кроме того, в тексте работы, на странице 154, автор ссылается на таблицу 6.15 – «...значения деформации передней опоры для нагретого состояния станка» и на таблицу 6.16 – «...для холодного состояния станка». Однако наименования указанных таблиц не соответствуют формулировкам в тексте.

Рисунки 5.10, 5.12, 5.14, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30, 5.32 приведены диаграммы Кэмпбелла. Из-за низкого качества данных рисунков оценить результаты, приведенные на них, не представляется возможным.

Пятое замечание. Изложение некоторых положений работы представлено сложно, усложняя понимание того, что на самом деле хотел сказать автор.

Еще одно замечание по ходу заседания, автор на странице 23 рассматривает корпус шпиндельного узла, и говорит, что в большинстве случаев это параллелепипеды, указывает что корпуса цилиндрической формы редки. Сегодня на современных российских станках, например, которые выпускаются станкозаводом ООО НПО «Станкостроение» в г.Стерлитамаке, а также зарубежных станках, в частности DMG-Mori, применяют сменные шпиндельные узлы, то есть со сменным корпусом цилиндрической формы.

В целом диссертационная работа Якимова Михаила Владимировича является завершённым научным исследованием, выполнена на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты и выводы соответствуют поставленным в диссертации целям и задачам. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Высказанные выше замечания не снижают общей положительной оценки, представленной работы, которая соответствует по паспорту специальности 2.5.5.

Диссертация отвечает требованиям п.п. 9 - 14 положения ВАК Российской Федерации которым должны отвечать диссертации, представленные на соискание учёной степени кандидата технических наук, а ее автор – Якимов Михаил Владимирович – заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

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

Спасибо, Сергей Игоревич. Михаил Владимирович, пожалуйста, ответы на замечания.

Соискатель Якимов М. В.

По первому замечанию. В указанных работах приведены исследования шпиндельных узлов для которых определялись динамические характеристики, при нахождении которых центробежная сила относится к внешнему силовому фактору. В наших исследованиях центробежная сила является одной из проявлений конструктивных особенностей шпиндельного узла, в связи с чем мы отнесли ее к группе внутренних силовых факторов.

По второму замечанию. С замечанием согласен.

По третьему замечанию. С замечанием согласен. Указанные ошибки возникли в связи перекомпоновкой содержания глав.

Четвертое замечание. С замечанием согласен. Добиться лучшего качества сохранения данной диаграммы из программного комплекса Ansys добиться не удалось.

Пятое замечание. С замечанием соглашусь, бывают несколько неудачные фразы, которые не совсем понятны.

И с последним дополнительным замечанием тоже согласен.

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

Спасибо. Сергей Игоревич, как Вам ответы соискателя?

Официальный оппонент к-т техн. наук, доцент Фецак С.И.

Хорошо, ответы на вопросы удовлетворяют.

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

Спасибо Сергей Игоревич. Сейчас приступаем к обсуждению работы. Кто хочет выступить? Вячеслав Викторович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, доцент Епифанов В.В.

Мне работа понравилась. Все в ней логично построено и теоретическая часть и практическая. Теоретические положения имеют доказательства. Что-то не до конца прояснилось, например, как влияет тип подшипника: шариковый, роликовый и т.п., как влияет смазка не показано в работе, нет технологических экспериментов исследования параметров качества: точности, шероховатости и т.п. Тем не менее это не снижает достоинства работы. В целом соискатель защищался достаточно уверенно. Работа апробирована путем большого числа публикаций. Я думаю работу поддержать.

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

Спасибо, Вячеслав Викторович. Александр Николаевич, пожалуйста.

Д-р техн. наук, доцент Унянин А.Н.

Во-первых, я считаю, что работа обладает актуальностью, научной новизной. Примерно и то, и другое одинаково сформулировано у соискателя, оппонентов и в отзывах ведущих организаций. Поэтому, я повторяться не буду. В качестве замечаний, можно сказать, что не со всеми результатами численного моделирования я согласен, в частности много вопросов по стыку. Нужно было бы сборку учесть, а учитывались отдельные детали. По поводу практического выхода, не из всех результатов исследования можно сделать практические выходы, например, если температурные деформации выполнены при

одном температурном поле, это можно принять во внимание, но практического выхода не сделать. Ответы на вопросы Леонида Викторовича и Вячеслава Викторовича, также дают понять, что нет практического выхода из того, о чем они спрашивали диссертанта. Тем не менее эти замечания не влияют на общую положительную оценку работы, поэтому я буду голосовать за.

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

Спасибо, Александр Николаевич. Николай Васильевич, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Носов Н.В.

Мы несколько раз на кафедре слушали Михаила Владимировича, и я видел, как последовательно, поступательно он шел к своей цели. Работа постоянно улучшалась и по содержанию, и по наполнению. Но я увидел ключевые моменты, которые изменили работу, и ключевым моментом я бы посчитал научно-технический совет УлГТУ. Вы позволили сформулировать несколько иную трактовку диссертационной работы - это улучшило цельность работы. Замечания, которые были сделаны на кафедре устранены полностью. Ряд разделов значительно улучшился по содержанию. Зная работоспособность и профессиональную деятельность, Михаила Владимировича, я считаю, что он заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

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

Спасибо, Николай Васильевич. Леонид Викторович, пожалуйста.

Д-р техн. наук, профессор Худобин Л.В.

За многие годы существования нашего диссертационного совета, мы слушали достаточно много диссертаций представленных Александром Федоровичем Денисенко. У меня сложилось такое впечатление, что это всегда были крепкие прагматические работы, когда без всяких ненужных фантазий, писались практические задачи с очевидной полезностью. Эта работа, которую мы заслушали сегодня, в ряду этих работ, не выпадает из этого славного ряда, а продолжает его. Меня смутило одно из замечаний оппонента относительно

технического оформления, до сих пор я этого не замечал, все работы были правильно оформлены, но бывают иногда и недостатки. Я с удовольствием, буду голосовать за утверждение этой защиты.

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

Спасибо, Леонид Викторович. Есть кто еще хочет высказать свое мнение? Михаил Владимирович, вам слово.

Соискатель Якимов М. В.

Я бы хотел поблагодарить всех членов диссертационного совета за объективную критику. Все замечания будут проработаны и устранены. Я продолжу работать над своими задачами и попытаюсь расширить материал, который был получен, чтобы получить более объективные результаты. Всем спасибо.

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

Спасибо, Михаил Владимирович. Объявляется перерыв на голосование. Слово предоставляется Николаю Ивановичу Веткасову, чтобы он огласил нам результаты тайного голосования.

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

Результаты голосования, следующие за - четырнадцать, против - два.

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

Прошу вас утвердить результат тайного голосования и, соответственно, протокол. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 20 человек, в состав совета дополнительно введены 0 человек, присутствовало на заседании 16 членов совета, в обычном режиме 10 человек и в дистанционном режиме 6 человек. В том числе, докторов наук по профилю данной диссертации 10 человек. Результаты голосования по вопросу присуждения ученой степени кандидата технических наук Якимову Михаилу Владимировичу: за - четырнадцать человек, против - два, председатель совета и ученый секретарь. Кто за утверждение протокола, прошу поднять руку.

Официальный оппонент д-р техн. наук, профессор Сабиров Ф.С.

Владимир Петрович, можно замечание?

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

Да, Фан Сагирович.

Официальный оппонент д-р техн. наук, профессор Сабиров Ф.С.

Владимир Петрович, по инструкции если члены совета участвуют в дистанционном формате, то голосование должно быть очное.

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

Нет, Фан Сагирович. К сожалению, в соответствующем документе указано, что если даже один член диссертационного совета находится в дистанционном формате, то все члены совета голосуют тайным электронным голосованием. Я сейчас вам зачитаю этот момент: «...все участники заседания голосуют тайным электронным голосованием. Участие хотя бы одного члена совета в дистанционном формате предопределяет проведение заседания в удаленном режиме и все участвующие члены совета голосуют электронно». Хотя это не понятно, присутствующие очно члены совета могли проголосовать традиционно. Но к сожалению, все так, как я озвучил ранее.

Дальше мы с вами продолжаем. У всех членов совета есть заключение по диссертации. Есть предложение принять указанное заключение за основу. Нет возражений? Нет. Принимается.

Обсуждение заключения

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

Есть предложение принять проект заключения в целом с учетом высказанных замечаний. Прошу проголосовать. Единогласно – за, против – нет. На этом защита окончена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ОБЪЕДИНЕННОГО ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА
99.2.001.02, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕН-
НОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕ-
СКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» И ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБ-
РАЗОВАНИЯ «ТОЛЬЯТТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИ-
ТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ ПО
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета
от 27 декабря 2021 г. № ____

О присуждении Якимову Михаилу Владимировичу, гражданину Россий-
ской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обес-
печения изотропных упругих характеристик опор» по специальности 2.5.5 –
«Технология и оборудование механической и физико-технической обработки
(технические науки)» принята к защите 25 октября 2021 г., протокол №
67, объединенным диссертационным советом 99.2.001.02, созданным на
базе федерального государственного бюджетного образовательного учре-
ждения (ФГБОУ) высшего образования (ВО) «Ульяновский государствен-
ный технический университет», ФГБОУ ВО «Тольяттинский государствен-
ный университет», Министерства науки и высшего образования РФ, по
адресу 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32, действующим на ос-
нове приказа №123/нк от 17.02.2015 г.

Соискатель Якимов Михаил Владимирович, 1985 года рождения.

В 2007 году соискатель окончил федеральное государственное бюджет-
ное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет» по специальности
050501 «Профессиональное обучение (машиностроение)» и получил квалифи-
кацию педагог профессионального обучения.

В период подготовки диссертации соискатель Якимов Михаил Влади-
мирович работал в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический уни-
верситет» в должностях ведущего инженера, по совместительству старшего
преподавателя. В 2020 году поступил в очную аспирантуру федерального гос-
ударственного бюджетного образовательного учреждения высшего професси-

онального 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)», где обучается в настоящее время.

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. Сабиров Фан Сагирович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» Министерства науки и высшего образования РФ, кафедра станков, профессор.

2. Фецак Сергей Игоревич, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» Министерства науки и высшего образования РФ, кафедра «Автоматизация технологических процессов», доцент.

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Оренбургский государственный университет», г. Оренбург, в своем положительном заключении, рассмотренном на заседании кафедры «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет» подписанном д-ром техн. наук, профессором, заведующим кафедрой «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» А.Н. Поляковым и утвержденном проректором по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д-ром физ.-мат. наук, проф. С.Н. Летутой, указала, что диссертация Якимова М.В. на тему: «Повышение точности шпиндельных узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор» является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение научной задачи повышения точности шпиндельных узлов путем снижения анизотропии их упругих характеристик, имеющей существенное значение для станкостроения. Работа выполнена на достаточно высоком научно-теоретическом уровне, методики и средства выполненных исследований соответствуют решаемым задачам.

На основании изложенного, учитывая актуальность работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость, а также уровень и объем выполненных исследований, рассмотренная диссертация удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г., предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Якимов Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

Соискатель имеет 23 опубликованные работы по теме диссертации, в том числе 9 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 2 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и 1 патенте РФ.

Наиболее значимые работы соискателя по теме диссертации:

1. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Формирование точностных и жесткостных характеристик опор роторного узла при сборке // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», №3 (25), 2009. - С. 132-139.

2. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Разработка конечно-элементной модели для определения упругих характеристик шпиндельных узлов // СТИН, №8, 2011. -С. 9-13.

3. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Моделирование опоры качения при конечно-элементном анализе шпиндельных узлов металлорежущих станков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (35), 2012. - С. 126-132.

4. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Экспериментальная оценка анизотропии жесткости передней опоры шпиндельного узла токарного станка // «Инженерный вестник Дона», 2015, №1. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2015/2854>

5. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Определение собственных изгибных частот шпинделя металлорежущего станка с учетом анизотропной упругости опор // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», №1 (45), 2015. - С. 159-166.

6. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Учет анизотропии упругих свойств передней опоры шпиндельного узла токарного станка при изготовлении деталей приборов // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», №3 (47), 2015. - С. 91-99.

7. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Изгибные колебания шпинделя металлорежущего станка с учетом анизотропной упругости опор // Известия Волгоградского государственного технического университета. №9 (204), 2017. С.32-34.

8. Денисенко А.Ф., Якимов М.В. Влияние температуры опоры шпиндельного узла на ее жесткость // Вестник Брянского государственного технического университета. №3 (56), 2017. - С.85-92.

9. Денисенко А.Ф., Якимов М.В., Борисова К.Р. Анизотропия радиальной жесткости расточки корпуса под опоры шпинделя токарного станка // Вестник Брянского государственного технического университета, 2021. №5 (102). - С. 23-31.

11. Denisenko A.F., Yakimov M.V. Determining elastic spindle characteristics by the finite-element model // Russian Engineering Research. 2011. Т. 31. № 11. - С. 1133 - 1136.

12. Denisenko A.F., Yakimov M.V. Dynamics of Spindle Assembly Metal-Cutting Machine Tool with Anisotropic Elastic Support // Proceedings of the 4th. International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham, pp 1647-1655.

На диссертацию и автореферат поступили:

1. Отзыв ведущей организации - **ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет»** подписанный д-ром техн. наук, профессором, заведующим кафедрой «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты» А.Н. Поляковым и утвержденный проректором по научной работе ФГБОУ ВО «Оренбургский государственный университет», д-ром физмат. наук, проф. С.Н. Летутой. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Модель опоры качения, описанная в главе 3, обладает линейными упругими свойствами, что не полностью отражает жесткостные характеристики подшипников качения. 2. Не указано проводилась ли апробация способа компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков, описанного в главе 4. 3. В диссертации отсутствуют фотографии натурных и стендовых испытаний. 4. В работе использована геометрическая модель точности, что в неполной степени отражает физику процесса. 5. В главе 6 недостаточно внимания уделено статистической обработке экспериментальных данных. 6. Эксперименты, описанные в главе 6, проводились на станках токарной группы. Представляет интерес выполнение указанных исследований на станках других групп, в частности координатно-расточных.

В целом, отмеченные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы Якимова М.В.

2. Отзыв официального оппонента - **Сабирова Фана Сагировича**, доктора технических наук, профессора кафедры станков ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»». Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Анизотропия жесткости исследовалась только на фланце шпинделя. Наличие оснастки (патрон и т.п.) может существенно изменить анизотропию жесткости. 2. Не проанализирована модель влияния анизотропии жесткости на параметры точности обрабатываемой детали (некруглость, волнистость и т.п.). 3. Не освещены вопросы положительного использования анизотропии упругих свойств передней опоры шпинделя за счет определенной ориентации осей жесткости с целью повышения технологической жесткости, как это реализовано в партии токарных станков на заводе «Красный пролетарий». 4. В разделе 5.3 выполнен расчет собственных частот шпиндельного узла в диапазоне частот вращения 0-20000 об/мин. Однако рассматриваемый токарный станок 16Б16Т1 имеет максимальную частоту вращения 2000 об/мин и с частотой вращения 20000 никогда работать не будет. 5. Приводится спорное положение (стр. 21), что «Шпиндель считается виброустойчивым, если собственная частота шпинделя в опорах $f_c \geq 250$ Гц (для станков нормальной точности) и $f_c \geq 500$ Гц (для станков повышенной точности)». Виброустойчивость станка, и шпиндельного узла в частности, как способность вести обработку без потери устойчивости, зависит от динамических характеристик упругой системы и шпиндельного узла, а не от класса точности станка. 6. Шифр специальности в автореферате указан не верно (02.05.05 вместо 2.5.5), но это следует рассматривать как техническую ошибку, которая не снижает достоинства работы. 7. В работе есть ряд неудачных терминов, выражений, ошибок, например, стр. 15: «Шпиндель, имеющий дисбаланс приводит к возникновению колебаний»; стр. 13 – не указан номер рисунка, на который идет ссылка; стр. 17, рис. 1.6 – не показана сила резания R ; стр. 139, табл. 5.3 – собственные частоты приведены с точностью до 5-ти значащих цифр, тогда как в модели есть упрощения и допущения и значащих цифр при таких расчетах бывает не более 3-х; стр. 57 – нечитаемые данные на рис. 2.7-2.8; плохо читаемый рис. 3.2. Кроме того, в диссертации имеются опечатки и стилистические погрешности (стр.: 5, 9, 12, 22, 34, 39, 46, 54, 55, 63, 66, 90, 113, 116, 117, 137, 146, 148 и др.).

3. Отзыв официального оппонента - **Фецака Сергея Игоревича**, кандидата технических наук, доцента кафедры «Автоматизация технологических процессов» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет». Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Центробежную силу, возникающую в следствии наличия дисбаланса тела

шпинделя и конструктивных элементов, установленных на нем автор считает внутренним силовым фактором. В работах Левиной З.М., Зверева И.А. и других авторов данная сила относится к внешнему силовому фактору. 2. Автор на странице 7 утверждает, что «достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях теории проектирования ШУ...». Вероятно, автор имел в виду методы или алгоритмы проектирования ШУ. 3. В работе встречаются ссылки на рисунки, название которых не соответствует подрисуночным надписям. Например, на странице 17 приведена ссылка на рисунок 1.4 (Под действием всего комплекса внешних и внутренних факторов смещения шпинделя проявляются как случайные функции.), а рисунок 1.4 имеет подрисуночную надпись: «Формирование центробежной силы роторной системы при наличии дисбаланса». То же замечание относится к некоторым таблицам, представленным в работе. Например, на странице 68 в тексте автор обращается к таблице 1, на самом деле он имеет в виду таблицу 3.1. Кроме того, в тексте работы, на странице 154, автор ссылается на таблицу 6.15 – «...значения деформации передней опоры для нагретого состояния станка» и на таблицу 6.16 – «...для холодного состояния станка». Однако наименования указанных таблиц не соответствуют формулировкам в тексте. 4. На рисунках 5.10, 5.12, 5.14, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22, 5.24, 5.26, 5.28, 5.30, 5.32 приведены диаграммы Кэмпбелла. Из-за низкого качества данных рисунков оценить результаты, приведенные на них, не представляется возможным. 5. Изложение некоторых положений работы представлено сложно, усложняя понимание того, что на самом деле хотел сказать автор.

4. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»**, г. Омск, подписанный д.т.н., профессором, профессором кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Поповым Андреем Юрьевичем и ассистентом кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Блохиным Дмитрием Андреевичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В автореферате не указано, проводились испытания или расчеты для шпинделей с наклонным расположением оси вращения, а также влияние износа подшипников на точность узла? 2. В автореферате нет данных о погрешностях и повторяемости экспериментально измеренных значений и говорится лишь о конкретных значениях. 3. Несоответствие наименования осей в расчетах, приведенных в 5 главе, с общепринятыми обозначениями осей шпинделей на металлорежущих станках (ось Z сонаправлена с осью вращения шпинделя, ГОСТ 23597-79).

5. Отзыв из **Самарский филиал 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. Не

указан тип ПФЭ при разработке регрессионной модели (стр. 9-10). Проверка адекватности модели должна проводиться по статистическим критериям Стьюдента и Фишера. Насколько оправдана оценка адекватности путем сравнения результатов расчета перемещений по уравнению регрессии с результатами, полученными с использованием конечно-элементной модели, как это предлагается автором? 2. При определении влияния температуры на упругие характеристики шпиндельных опор не указан диапазон изменения температуры и его соответствие с реальными температурами, наблюдаемыми при эксплуатации станка (стр. 13).

6. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»**, г. Тула, подписанный д.т.н., доцентом по кафедре автоматизированных станочных систем, профессором кафедры «Технология машиностроения» Трушиным Николаем Николаевичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Наименование рис. 2 «Модели сборки опоры» на самом деле представляют собой схемы взаимного расположения вала и корпуса. 2. Фраза из 6-ого вывода «... предпочтение следует отдавать конструкциям корпусов с минимальным числом дополнительных отверстий...» представляется очевидной. 3. Каким образом разработки соискателя могут быть применены к шпиндельным опорам на подшипниках скольжения? 4. Каким образом учитывается разброс параметров подшипников, которые устанавливаются в опору парами? 5. Соискатель утверждает, что при проектировании корпуса шпиндельного устройства «... для станков с горизонтальной компоновкой также требуется принимать во внимание вес шпинделя». Получается, что для станков с вертикальной компоновкой массой (весом) шпинделя можно пренебречь? 6. Какова целесообразность применения разработанных способов для серийных станков нормального класса точности?

7. Отзыв из **ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»**, г. Самара, подписанный д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой технологий производства двигателей Хаймовичем Александром Исааковичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Указано, что в четвертой главе выполнено моделирование температурных полей передней стенки корпуса шпиндельного узла. Не понятно, для какого конструктивного исполнения корпуса выполнялся расчет. 2. В главе 3 разработаны регрессионные модели упругих перемещений опор. Проверку их адекватности целесообразно провести с использованием F-критерия Фишера, а статистическую достоверность коэффициентов регрессии оценить с помощью t-критерия Стьюдента. Это повысило бы научную значимость представленных результатов регрессионного анализа.

8. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева»**, г. Красноярск, подписанный к.т.н., доцентом, заведующим кафедрой технологии машиностроения Ручкиным Леонидом Владиленовичем и к.т.н., доцентом, доцентом кафедры технологии машиностроения Раменской Еленой Владимировной. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Во второй главе приводятся значения анизотропии подшипников шпиндельных узлов при изменении отклонения от круглости без указания рассматриваемых диаметральных размеров. 2. В пятой главе при проведении оценки изменения диапазонов собственных частот шпинделя не представлены их численные значения и линейно-диаметральные размеры шпинделя. 3. В шестой главе не указаны: материалы комплектов опытного образца и качество поверхностей контакта; диапазон температур шпиндельного узла; необходимое количество измерений; метод обработки экспериментальных данных.

9. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»**, г. Волгоград, подписанный д.т.н., доцентом, профессором кафедры «Технология машиностроения» Агаповым Сергеем Ивановичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Из автореферата неясно, на каких моделях станков проводились исследования и при помощи какой контрольно-измерительной аппаратуры. 2. На стр. 6 автореферата указан подшипник 697713Л без обозначения его точности, что затрудняет оценку результатов исследований. 3. Интересны были бы исследования ШУ современных станков с ЧПУ, использующих мотор-шпиндель.

10. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»**, г. Ковров, подписанный д.т.н., профессором, профессором кафедры «Технологии машиностроения» Житниковым Юрием Захаровичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Из-за краткого изложения не прозвучало в реферате физики процесса влияния анизотропии на упругие характеристики опор. 2. В автореферате следовало бы более подробно описать модель сборки и указать причину деформации колец.

11. Отзыв из **ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» Политехнический институт**, г. Красноярск, подписанный к.т.н., доцентом кафедры «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» Курзаковым Андреем Сергеевичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Одна из указанных задач диссертационной работы (пункт 6, стр. 4) – «определение влияния силовых факторов на погрешности формы отверстий в корпусе под подшипники при работе станка на холостом ходу» 2. Величина анизотропии (например, рисунок 5 на стр. 11) указана в безразмерных единицах. Остается неясным, насколько эти значения велики и к каким размерным отклонениям приводит выявленная анизотропия.

12. Отзыв из **ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет»**, г. Москва, подписанный д.т.н., профессором, профессором кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Вартановым Михаилом Владимировичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В технологии сборки машин известен способ совмещения контуров деталей с учетом их пространственных погрешностей. Автор упоминает в автореферате возможности применения данного способа, однако его технологическая реализация при сборке подшипниковых узлов в автореферате не раскрыта. 2. В автореферате не раскрыты возможности уменьшения собственного дисбаланса шпинделя. 3. Ничего не говорится о возможности повышения жесткости на основе применения двухрядных подшипников со смещенным расположением роликов.

13. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»**, г. Пенза, подписанный д.т.н., доцентом, заведующим кафедрой «Технология машиностроения» Зверовщиковым Александром Евгеньевичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. Как моделировался преднатяг в соединении и нелинейность контакта в сопряжениях подшипника с валом и корпусом. 2. По какому количественному критерию оценивалась адекватность КЭ модели реальному процессу. 3. Одномассовая схема расчета шпинделя представляется весьма упрощенной, уместно будет представление этого узла в виде модели как минимум двухмассовой, с двумя участками, один из которых будет консольным с сосредоточенной массой на конце, второй – с массой между пружинами.

14. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»**, г. Ярославль, подписанный к.т.н., доцентом, доцентом кафедры «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения» Шапошниковым Александром Михайловичем и к.т.н., заведующим кафедрой «Компьютерно-интегрированная технология машиностроения» Порсевым Кириллом Игоревичем. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1. В автореферате отсутствуют сведения о технико-экономическом эффекте, полученном от внедрения диссертационной работы. 2. В автореферате не отражено влияние типа подшипника в передней опоре шпинделя на анизотропию упругих характеристик опоры.

15. Отзыв из **ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева»**, г. Казань, подписанный к.т.н., доцентом, доцентом кафедры технологии машиностроительных производств Кувшиновым Павлом Ивановичем и старшим преподавателем кафедры технологии машиностроительных производств Шестаковой Екатериной Александровной. Отзыв положительный со следующими замечаниями: 1.

Чем объясняется значительная погрешность (22,96%) упругих перемещений опор в радиальном направлении (стр. 10)?

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, обладают 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:

разработаны математическая модель изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками и упруго-деформационная конечно-элементная модель подшипника в виде сплошного кольца с определенными свойствами материала, исключающая из использования при разработке численной модели подшипника все конструктивные элементы опоры, отражающие упругие характеристики;

разработана секторная конечно-элементная модель опоры качения с различными ортотропными упругими свойствами материалов секторов, позволяющая учесть любую форму анизотропии податливости;

предложен способ компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков и устройство, его реализующее;

доказано наличие закономерностей влияния упругих характеристик опор, конструктивных и скоростных параметров шпиндельных узлов на собственные частоты и формы колебаний шпинделя;

новые понятия **не вводились**.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказана возможность повышения точности шпиндельного узла путем обеспечения стабилизации изотропных упругих характеристик его опор;

применительно к проблематике диссертации результативно использованы лицензионный программный комплекс «ANSYS» для моделирования анизотропных жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов,

натурный эксперимент по оценки анизотропии упругих характеристик шпиндельных узлов действующего оборудования, а также многофакторное планирование эксперимента для получения регрессионной модели упругих перемещений опоры.

изложены доказательства влияния анизотропии упругих свойств опор на точность и динамические характеристики шпиндельных узлов.

раскрыты закономерности формирования анизотропии жесткостных характеристик опор шпиндельных узлов;

изучены связи и закономерности влияния температурного фактора на характер анизотропии податливости опор;

проведена модернизация существующей математической модели изгибных колебаний ротора на опорах с одинаково ориентированными анизотропными упругими характеристиками.

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

разработаны и внедрены новые методики учета влияния погрешностей изготовления и сборки на упругие деформации шпиндельного узла на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средне-волжского станкозавода» (г. Самара) и ООО Научно-производственное объединение «РОСИНМАШ», а также в учебном процессе подготовки бакалавров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» в ФГБОУ ВО СамГТУ;

определены перспективы практического использования полученных результатов диссертационного исследования для повышения точности шпиндельных узлов.

создано устройство для контроля анизотропии упругих характеристик ШУ в производственных условиях;

представлены рекомендации по снижению анизотропии характеристик жесткости опор 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;

теоретические исследования базируются на основных положениях классической механики, методах компьютерного и математического моделирования, известных законах упруго-пластического деформирования, теории метода конечных элементов и согласуются с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации;

идея заключается в оценке влияния анизотропии на точность шпиндельных узлов и базируется на анализе практики и обобщении передового опыта проектирования шпиндельных узлов современных металлорежущих станков;

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

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

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

Личный вклад соискателя состоит в:

непосредственном участии на всех этапах процесса: в выполнении научных исследований, как теоретического, так и экспериментального характера, необходимых для решения поставленных задач и достижения цели диссертационной работы: **разработке** упруго-деформационной конечно-элементной модели опоры шпиндельного узла с неидеальными элементами, **разработке** математической модели изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками, **разработке и создании** устройства для контроля анизотропии упругих характеристик ШУ в производственных условиях, **разработке плана экспериментальных работ** по определению анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка и влиянию температурного фактора на характер анизотропии податливости опор, **разработке** способа компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков и устройства, его реализующего; интерпретации и обобщении полученных данных, апробации и внедрении результатов исследования; подготовке основных публикаций по выполненной работе.

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».

Диссертация охватывает основные вопросы поставленной научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием плана исследований и основной идейной линии, взаимосвязью поставленных задач и полученных результатов, содержит новые научные результаты, свидетельствующие о личном вкладе автора диссертации в науку.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены научные результаты.

Диссертационный совет пришел к выводу, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая содержит решение актуальной задачи повышения точности шпиндельных узлов за счет обеспечения изотропных упругих характеристик опор, имеющей существенное значение для повышения точности обработки на металлорежущих станках.

Диссертационный совет подтвердил, что диссертационная работа Якимова М.В. соответствует критериям, установленным п.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 г и принял решение присудить Якимову М.В. ученую степень кандидата технических наук по специальности 2.5.5–Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в составе 16 человек, из них 10 докторов наук по специальности 2.5.5– Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), участвующих в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовал: за при- суждение ученой степени -14 человек, против – 2.

Председатель диссертационного совета
д.т.н., профессор

Ученый секретарь диссертационного совета
Д.Т.Н., доцент



Табачков В.П.

J Bay

Веткасов Н.И.

27 декабря 2021 г.