

ОТЗЫВ
официального оппонента на диссертационную работу
Якимова Михаила Владимировича «Повышение точности шпиндельных
узлов на основе обеспечения изотропных упругих характеристик опор»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических
наук по специальности: 2.5.5 – Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки (технические науки)

Точность шпиндельного узла (ШУ) определяется геометрической точностью изготовления и сборки элементов конструкции и точностью вращения под действием силовых факторов. Геометрическая точность шпиндельных узлов определяется двумя показателями: радиальным и осевым биениями, и при проектировании может быть определена согласно рекомендациям, полученным на основе опытных данных, расчетом на основе теории размерных цепей, и расчетом, использующим геометрические зависимости. Точность вращения шпинделя под действием силовых факторов зависит от природы возникновения нагрузки. К силовым факторам относится центробежная сила. Под действием центробежной силы центр шпинделя движется во время вращения по траектории, зависящей от двух взаимосвязанных характеристик: геометрической точности элементов конструкции и упругих характеристик опор, которые, имеют ярко выраженную анизотропию жесткости. В этом случае траектория движения центра шпинделя существенно отличается от окружности, характерной для ШУ с изотропной жесткостью опор. Таким образом, наличие анизотропии жесткости опор ШУ вносит дополнительные погрешности в баланс точности шпиндельных узлов. Поэтому задача по разработке обоснованных методик прогнозируемого обеспечения изотропных упругих характеристик шпиндельных узлов является актуальной.

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

Первая глава посвящена современному состоянию вопроса обеспечения точности шпиндельных узлов, показана актуальность исследований. Проанализированы существующие модели, применяемые для оценки эксплуатационных характеристик шпиндельных узлов. Отмечено, что недостаточно разработаны вопросы обеспечения изотропии упругих характеристик на этапе проектирования и изготовления. По результатам обзора сформулированы задачи исследования, связанные с повышением точности ШУ путем снижения анизотропии жесткости опор шпиндельных узлов.

Вторая глава посвящена анализу влияния точности изготовления и сборки элементов опоры качения на ее упругие характеристики. Оценку влияния точности изготовления посадочных поверхностей подшипниковой опоры на ее упругие характеристики проводили с помощью структурно-параметрической модели, представляющей собой параллельно-последовательное соединение элементов, определяемых податливостью соединений наружное кольцо – корпус, тела качения - наружное кольцо, внутреннее кольцо - тела качения, вал - внутреннее кольцо, податливостью наружного и внутреннего колец и тел качения. С помощью нее разработана модель сборки опоры, при использовании которой установлено, что наличие овальности на посадочных поверхностях вала и корпуса после запрессовки и приложения нагрузки приводит к деформациям колец подшипников, различным в зависимости от ориентации отклонений от округлости отверстия и вала.

Третья глава посвящена решению задачи по разработке упругодеформационной конечно-элементной (КЭ) модели опоры с учетом анизотропии упругих свойств, позволяющей оценить влияние точности изготовления посадочных поверхностей подшипниковой опоры качения на упругие характеристики и возможную анизотропию упругих деформаций.

Четвертая глава посвящена разработке КЭ модели корпуса ШУ и определению влияния его конструкции на погрешности формы отверстий под подшипники шпинделя при действии силового и температурного факторов.

В пятой главе проведен анализ влияния анизотропии податливости опор шпинделя на динамические характеристики шпиндельного узла с использованием математической модели изгибных колебаний и результатов модального анализа. Математическая модель изгибных колебаний шпинделя разработана с учетом анизотропной упругой характеристики опор и взаимной ориентации осей жесткости. С использованием модального анализа проведена оценка изменения диапазонов собственных частот для каждой формы колебаний ШУ.

В шестой главе приведены результаты экспериментального определения анизотропии упругих характеристик опор шпиндельных узлов и оценки влияния температурного фактора на анизотропию. Для проведения исследований было разработано и изготовлено устройство для измерения упругих деформаций передней опоры шпиндельного узла токарного станка, позволяющее, используя внутреннюю коническую поверхность шпинделя, нагружать радиальной силой в произвольном направлении.

В результате выполнения диссертационной работы **автором:**

1. Установлено, что анизотропия упругих характеристик подшипников шпиндельных узлов среднего типоразмера при изменении отклонения от окружности посадочных поверхностей (корпус или вал) от 1 до 3 мкм увеличивается с 1,13...1,15 до 1,36...1,42. Наличие овальности на посадочных поверхностях приводит к деформациям колец подшипников, различным в зависимости от ориентации отклонений от окружности отверстия и вала, что вызывает смещение центра вала после запрессовки.
2. Разработана упруго-деформационная конечно-элементная модель в виде сплошного кольца с определенными свойствами материала, что дает возможность исключить из использования при проектировании КЭ модели подшипника, отражающие все конструктивные элементы опоры. На основе проведения полного факторного эксперимента для выбора свойств материала КЭ 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.
3. Предложена конструкция устройства и методика измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка.
4. Проведены экспериментальные исследования шпиндельного узла токарного станка среднего типоразмера. Исследования показали, что анизотропия упругих характеристик, оцениваемая отношением максимальных упругих перемещений к минимальным в зависимости от направления действия силы, достигает 8...16. Установлено, что характер изменения анизотропии близок по форме к овалу. Обеспечение изотропных упругих характеристик опор снижает биение переднего конца шпинделя от внутреннего силового фактора (дисбаланс) примерно на 30%.
5. 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.
6. Проведены численные эксперименты, которые показали, что обеспечение изотропии упругих характеристик при проектировании корпуса ШУ 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 шпиндель-

ные 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.

7. 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.

8. 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, межпорного 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. С использованием модального анализа аналогичный результат получен для первой и второй форм колебаний ШУ.

Научная новизна заключается в следующем:

- получение закономерностей формирования анизотропии жесткости опор шпиндельных узлов и регрессионной зависимости упругих перемещений опоры на основе проведения полных факторных экспериментов;
- разработка математической модели изгибных колебаний шпинделя на опорах с произвольно ориентированными анизотропными упругими характеристиками;
- получение закономерностей влияния температурного фактора на характер анизотропии податливости опор;
- получение закономерностей влияния жесткости опор, элементов конструкции ШУ и частоты вращения шпинделя на собственные частоты и формы колебаний.

Практическая значимость работы заключается в:

- обоснованных рекомендациях по снижению анизотропии жесткости опор шпиндельных узлов;

- разработке конструкции устройства для измерения анизотропии упругих характеристик передней опоры шпиндельного узла токарного станка в производственных условиях и методики проведения исследований и обработки результатов;
- разработке нового способа и устройства компенсации упругих тепловых деформаций подшипников шпинделей металлообрабатывающих станков.

Полученные результаты апробированы и приняты к внедрению на предприятиях ООО «Инженерный центр «Средневолжского станкозавода» (г. Самара) и ООО Научно-производственное объединение «РОСИНМАШ».

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

Полученные автором результаты базируются на корректном применении методов проектирования ШУ, 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 23 печатных работы, в том числе 9 статей в рецензируемых центральных журналах, входящих в перечень ВАК, 1 патенте и 2 публикации в изданиях, индексируемых в международной базе данных *Scopus*.

По диссертации имеются следующие замечания:

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 цен-

тробежной 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.

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.

Общая оценка диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Якимова Михаила Владимировича является завершенным 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 (05.02.07) следующим пунктам области исследования:

- п.1. Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т.д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий.
- п.3 Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.
- п.5. Создание, включая исследования, проектирование, расчеты, комплектующих агрегатов и механизмов, обеспечивающих достижение требуемых технологических и технико-экономических параметров оборудования.

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 (технические науки).

Официальный оппонент:

Доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов»

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

к.т.н., доцент

Фецов Сергей Игоревич

Кандидатская диссертация защищена по специальности 05.03.01 - Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Адрес места работы:

450008, Уфа,

ул. Карла Маркса, д. 12

тел. +7(908) 3502176

к.т.н., доцент Фецов Сергей Игоревич

e-mail: format_invest@mail.ru



Подпись Фецов С. И.
Составлено 01 12 2021 г.
Начальник отдела документационного обеспечения
Рахимова А. Р.
и архива