

На правах рукописи



ПОДКРУГЛЯК ЛЮБОВЬ ЮРЬЕВНА

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОХОДНОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА
НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО ТЕПЛОВОГО
СОСТОЯНИЯ**

Специальность 2.5.5 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ульяновск - 2023

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»).

Научный руководитель **Денисенко Александр Федорович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Кузнецов Александр Павлович**
доктор технических наук, профессор
ООО «КЕВ - РУС»
Советник Генерального директора

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

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

Защита диссертации состоится 26 декабря 2023 г., в 12:00 ч., на заседании объединенного диссертационного совета 99.2.001.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, г. Ульяновск, ул. Северный венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32, главный учебный корпус, ауд. 211.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте Ульяновского государственного технического университета, адрес сайта: www.ulstu.ru.

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Н.И. Веткасов

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования.

Одной из основных тенденций совершенствования конструкций современных металлорежущих станков (МРС) является повышение их быстроходности, обеспечивающей рост производительности обработки с сохранением требуемой точности. Однако сдерживающим фактором при этом выступает увеличение температуры шпиндельных узлов (ШУ), точность которых на 80% определяет точность станка в целом. Согласно многочисленным исследованиям тепловая погрешность МРС составляет 40-70% в общем балансе погрешностей, и она тем больше, чем выше требования, предъявляемые к точности обрабатываемых деталей.

Основные требования к шпиндельным узлам были сформулированы в работах А.С. Проникова, В.Э. Пуша, А.В. Пуша, Д.Н. Решетова, Ю.Н. Соколова, А.М. Фигатнера, С.С.Левиной, П.М. Чернянского, И.А. Зверева и других отечественных и зарубежных ученых, где также было отмечено, что теплостойкость шпинделей является важнейшей их характеристикой, в значительной мере определяющей точность обработки деталей на станке.

Тепловые процессы в ШУ изучали И.А. Зверев, В.М. Попов, Е.И. Самохвалов, Л.Г. Никитина, А.П. Кузнецов, Я.Л. Либерман, Л.Я. Гиловой и другие ученые.

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

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

Определению теплового сопротивления соединений посвящены работы ряда исследователей: В.М. Попова, Ю.П. Шлыкова, В.М. Хохлова, С.Ю. Мяснянкина, М.В. Мурашова и др., которыми получены зависимости, адекватно описывающие экспериментальные данные. Однако, как правило, указанные зависимости сложно использовать в инженерной практике, т. к. они требуют большого количества исходных данных. Большое число факторов, оказывающих влияние на значение коэффициента теплопроводности соединений (параметры микрогеометрии, наличие макроотклонений, давление в стыке, масштабный фактор и т.д.) не всегда позволяет адекватно распространять полученные экспериментальные данные на другие виды контактных поверхностей.

Таким образом, повышение быстроходности ШУ на основе использования расчетных моделей, адекватно отражающих особенности реальных конструкций, является важной и актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является повышение быстроходности шпиндельного узла на основе использования тепловой модели, учитывающей макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Определены основные факторы, влияющих на контактное термическое сопротивление в стыках ШУ.

2. Получена регрессионная модель КТС плоского соединения деталей на основе использования контактной псевдосреды.

3. Проведена экспериментальная оценка влияния конструкторско-технологических факторов на КТС плоского стыка.

5. Разработана методика определения теплового состояния ШУ с использованием крупноблочных конечных элементов.

6. Разработаны конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности ШУ на основе температурного критерия.

Научная новизна работы:

- разработаны и обоснованы модели теплопроводности соединений деталей на основе использования псевдослоя, характеристики которого учитывают макро- и микроотклонения контактирующих поверхностей;

- выявлена степень влияния конструкторско-технологических факторов на контактные термические сопротивления;

- установлены закономерности формирования температурных полей шпиндельных узлов в условиях нескольких источников тепловыделения.

Практическая значимость и реализация работы:

- разработана методика определения теплового состояния деталей ШУ с использованием крупноблочных конечных элементов;

- получена регрессионная зависимость для определения КТС, позволяющая оценивать его с учетом основных параметров, задаваемых конструктором при проектировании;

- предложены конструкторско-технологические решения по повышению быстроходности ШУ;

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

Методология и методы исследований.

Достижение цели и решение поставленных в работе задач обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях теории проектирования ШУ и технологии машиностроения, теории математического моделирования с использованием численно-аналитических методов и методов математической статистики.

Экспериментальные исследования проводились с использованием аттестованных измерительных средств и с применением методов численного компьютерного моделирования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая модель изменения температуры при прохождении теплового потока через плоское соединение.
2. Результаты экспериментальных исследований влияния конструкторско-технологических факторов на КТС плоского стыка.
3. Инженерная методика построения температурных полей с использованием крупноблочных конечных элементов.
4. Тепловая модель шпиндельного узла в условиях нескольких источников тепловыделения.

Степень достоверности результатов исследований.

Достоверность изложенных в работе результатов обеспечивается: обоснованным изучением достаточного объема научной литературы, корректностью поставленных задач, корректным использованием применяемого математического аппарата и вводимых допущений и гипотез и подтверждается согласованностью теоретических выводов и данных моделирования с результатами их экспериментальной проверки.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты работы доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: IV международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (г. Новокузнецк, 2020), Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь ICMTMTE 2020, 2021), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2021, 2022), VII международной научно-практической конференции «Мехатроника, автоматика и робототехника» (г. Санкт-Петербург, 2023), Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные проблемы станкостроения – 2023 (АПС – 2023)» (г. Пенза, 2023).

В полном объеме диссертация докладывалась на заседании кафедры «Технология машиностроения, станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Публикации. Материалы диссертации отражены в 14 печатных трудах, из них 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и 3 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах данных.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, выводов, списка использованной литературы (204 источника) и 4 приложений. Объем диссертации – 131 страница, включая 68 рисунков и 30 таблиц в тексте.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследований, ее теоретическая и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены конструкции современных шпиндельных узлов, конструкторско-технологические требования к их элементам и современное состояние вопроса обеспечения теплостойкости ШУ.

Анализ литературы по теме диссертации показал, что среди множества факторов, влияющих на быстроходность и точность станка, большое значение имеют температурные погрешности. При этом главным источником температурной погрешности станка выступает тепловыделение в ШУ.

Обзор теоретических и экспериментальных разработок, опубликованных за последние 30 лет, показывает, что их значительная часть посвящена контактному термическому сопротивлению, которое возникает за счет несовершенства контакта между деталями.

Результаты опубликованных экспериментальных и теоретических исследований показали, что вследствие большого числа действующих факторов решение задачи теплообмена в зоне контакта твердых тел далеко от завершения.

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

По результатам обзора поставлена цель работы и сформулированы задачи исследования, связанные с повышением быстроходности ШУ.

Во второй главе решена задача по разработке математической модели формирования КТС.

Проведенные предварительные исследования в виде однофакторных экспериментов позволили выделить основные факторы, влияющие на КТС.

Современная теория контактирования поверхностей базируется на положении, что наличие шероховатости, волнистости и макроотклонений приводит к дискретности их взаимодействия.

Наличие значительного числа указанных факторов вызывает необходимость учета в соединениях деталей псевдослоя (псевдосреды), состоящего из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом (рис. 1).

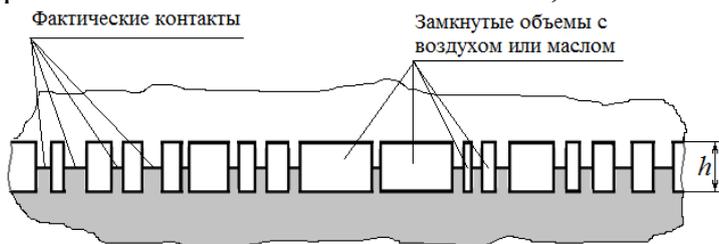


Рис. 1. Представление плоского стыка в виде псевдослоя толщиной h

Для оценки влияния характеристик псевдосреды при контакте двух твердых тел на условия формирования КТС была разработана плоская конечно-элементная модель контакта двух квадратных пластин (20x20 мм) толщиной 1 мм (рис. 2).



Рис. 2. Плоская модель контакта двух пластин

изменения температуры в зоне контакта (термического сопротивления контактной псевдосреды) от четырех выделенных факторов, варьируемых в диапазонах: $(x_1) - h = (1...4) \cdot 10^{-6}$ м; $(x_2) - q_a = (1...88) \cdot 10^6$ Н/м²; $(x_3) - \sigma_T = (150...275) \cdot 10^6$ Н/м²; $(x_4) - l = (0...2075) \cdot 10^{-6}$ м.

С помощью инструмента MS Excel «Регрессия» была проведена проверка значимости коэффициентов регрессионной зависимости, которая показала, что значимость факторов σ_T и l несущественна по сравнению с h и q_a и регрессионную зависимость можно использовать в виде:

$$\Delta T = 0,221 + 0,085 \cdot 10^6 h - 0,002 \cdot 10^{-6} q_a . \quad (1)$$

На основании (1) получено выражение для определения КТС соединения:

$$R = \frac{\Delta T \cdot \lambda}{q \cdot \lambda_{ПС}} = \frac{\lambda \sigma_T (0,31 + 0,118 \cdot 10^6 h - 0,0028 \cdot 10^{-6} q_a)}{0,48075 q_a (\lambda - \lambda_v) + \lambda_v \sigma_T}, \quad (2)$$

где q - тепловой поток, Вт/м²; λ - коэффициент теплопроводности материала деталей, Вт/(м·°К); λ_v - коэффициент теплопроводности воздуха (для контакта смазанных поверхностей значение λ_v заменяется на λ_m - коэффициент теплопроводности масла), Вт/(м·°К).

В третьей главе приведены результаты экспериментальной оценки влияния конструкторско-технологических факторов на КТС плоского стыка и численного моделирования методом конечных элементов прохождения теплового потока через плоский стык.

Для экспериментальной оценки влияния качества контактирующих поверхностей и давления в плоском стыке был использован стенд (рис. 3), состоящий из пары образцов-параллелепипедов размерами 40x20x10 мм, контактирующих по сторонам 20x10 мм, зажатых в машинные тиски.

При экспериментах были исследованы образцы, представленные на рис. 4.

Для снижения конвекционного излучения тепла образцы помещались в тепловую защиту, созданную с помощью трехслойной намотки асбестового шнура Ø 3

мм, склеенного жидким стеклом. Губки тисков были теплоизолированы от образцов листовым тектолитом толщиной 10 мм и 5-мм фанерой.

Тепловая защита оставляла открытыми на образцах две зоны измерения: в месте расположения источника тепла ($t_{ВХ}$) и в месте окончания движения теплового потока ($t_{ВЫХ}$) во втором образце (рис. 3).

При экспериментах мощность нагревательного элемента, Вт, определялась фиксацией потребляемого тока ($I=1,76...1,80$ А) и напряжения ($U=12,0$ В): $P=I \cdot U$. Измерение температуры на открытых участках образцов осуществлялось бесконтактным методом с помощью поверенного пирометра DT-8833.

Для определения усилия сжатия образцов тиски были предварительно оттарированы по прилагаемому моменту с использованием динамометра ДОСМ-1, у которого наибольшая предельная нагрузка составляет 10000 Н. При проведении экспериментов давление в стыке образцов менялось от 2 до 40 мПа.

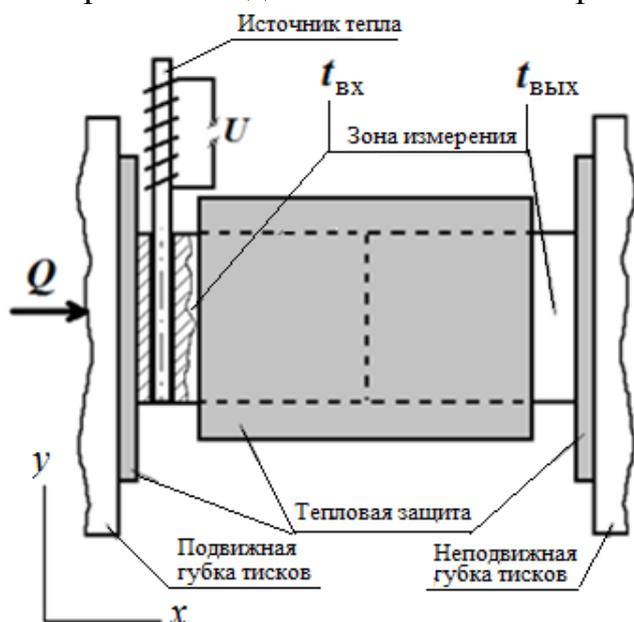


Рис. 3. Схема экспериментальной установки

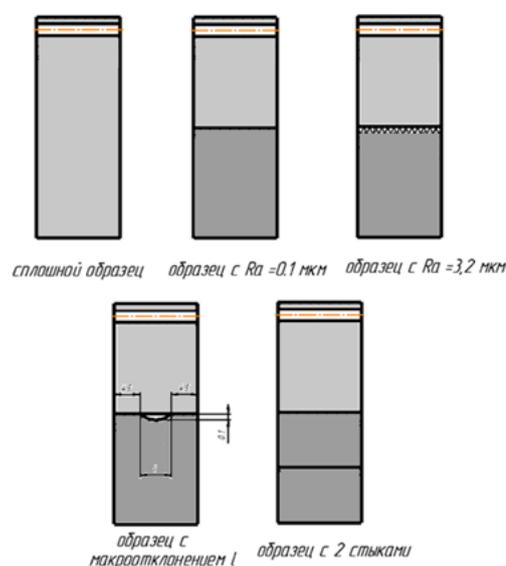


Рис. 4. Схемы исследуемых контактов

Регрессионные зависимости изменения температуры $\Delta t = t_{ВХ} - t_{ВЫХ}$ при прохождении теплового потока через стык от давления в стыке q_a по средним значениям 5...7 кратных измерений, представленные на рис. 5, подтверждают выводы ряда исследователей о том, что КТС стыка с увеличением шероховатости увеличивается.

Для оценки влияния макроотклонений на КТС проводились измерения Δt для контакта образцов с $R_{a1}=R_{a2}=0,1$ мкм, на одном из которых было выполнено искусственное макроотклонение в виде симметрично расположенной на контактной поверхности лунки максимальной глубиной 0,1 мм (см. рис. 4). Пересечение кривых на рис. 6 может быть объяснено увеличением зон фактического контакта и соответственно уменьшением контурных зон в контакте образцов.

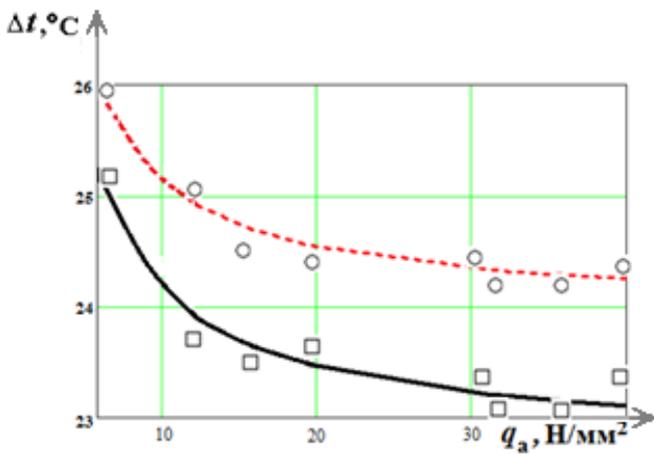


Рис. 5. Сравнение регрессионных зависимостей контакта двух образцов: сплошная линия - $R_{a1}=R_{a2}=0,1$ мкм; пунктирная линия - $R_{a1}=0,1$ мкм; $R_{a2}=3,2$ мкм

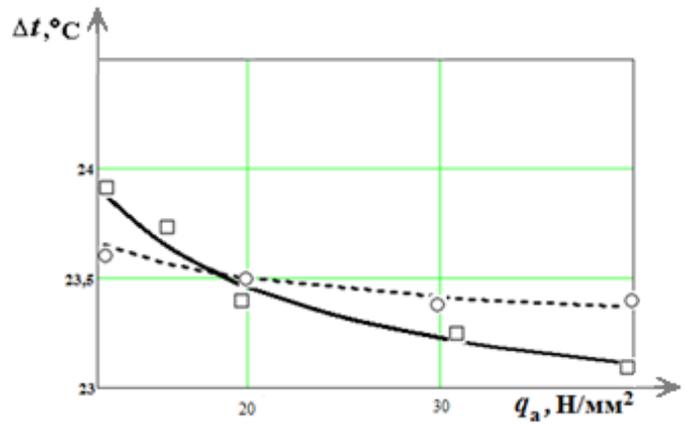


Рис. 6. Сравнение регрессионных зависимостей контакта двух образцов: сплошная линия - сплошной контакт с $R_{a1}=R_{a2}=0,1$ мкм; пунктирная линия - один образец с искусственным макроуклоном

Сравнение результатов экспериментов, проведенных при прохождении теплового потока через один или два стыка, расположенных последовательно (рис. 4), показало ожидаемое существенное увеличение ΔT для двух стыков, и подтвердило необходимость учета КТС при оценке распространения тепловых потоков в сборочных станочных единицах.

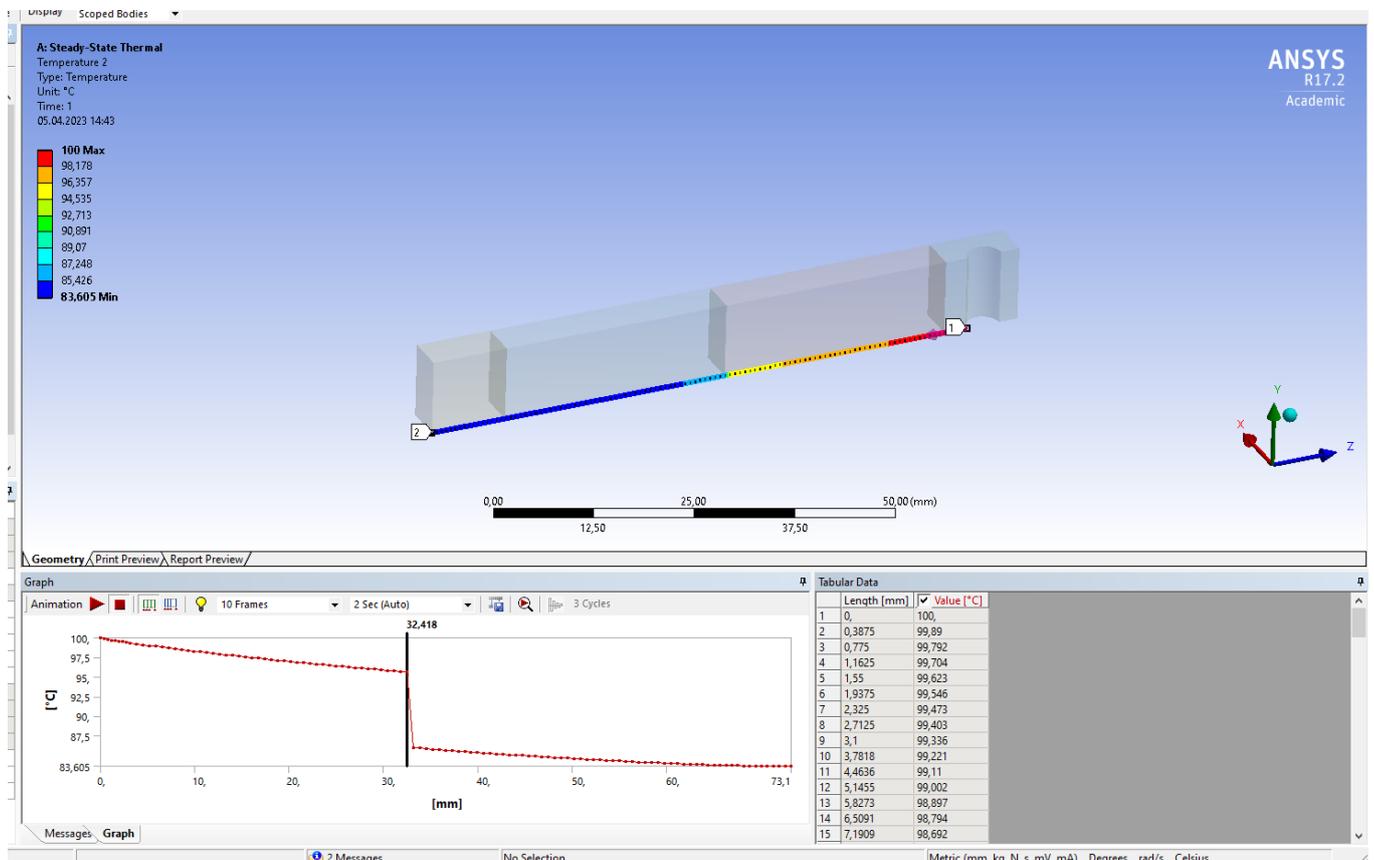


Рис. 7. Результаты численного моделирования экспериментальной установки

Для того, чтобы дополнить и расширить возможности натуральных экспериментов, задача прохождения теплового потока через плоский стык была решена в среде Workbench (WB) Ansys. В процессе расчета получены: градиент температуры вдоль выбранного пути по оси Z – направления движения теплового потока и график изменения температуры по длине образцов (рис.7). Коэффициент теплопроводности в зоне стыка выбирался таким образом, чтобы температуры на входе и выходе теплового потока соответствовали температурам натурального эксперимента. Проведенный численный эксперимент МКЭ позволил визуализировать тепловые поля и определять температуры в зоне контакта образцов, что в натуральном эксперименте сложно сделать из-за наличия тепловой защиты.

Четвертая глава посвящена разработке инженерной методики определения теплового состояния с использованием крупноблочных конечных элементов, позволяющей проводить КЭ анализ без применения дорогостоящего программного обеспечения.

Использование методики КЭ моделирования с крупноблочными конечными элементами в виде прямоугольных параллелепипедов предполагает, что для получения картины температурного поля в сборочной единице необходимо определить термические сопротивления для нескольких условий распространения теплового потока:

- от одного конечного элемента к другому в пределах одной детали. В этом случае коэффициенты теплопроводности КЭ будут одинаковыми в пределах детали, и определяться маркой материала;
- от одного конечного элемента к другому, расположенному в соседней детали, и имеющих в общем случае различные коэффициенты теплопроводности, зависящие от марки материала;
- прохождения теплового потока через замкнутые полости, заполненные воздухом или маслом, образовавшиеся при соединении отдельных деталей;
- распространения теплового потока в окружающую среду для конечных элементов, расположенных на наружном (свободном) контуре детали.

Так, например, в общем случае плоский i -й КЭ модели (рис. 8) может граничить с: n -м КЭ, относящимся к той же детали, что и i -й КЭ (пунктир на рис. 8); g -м и l -м КЭ, относящимся к другой детали сборочной единицы (сплошная линия на рис. 8); внешней средой.

Таким образом, ячейка тепловой модели i -го КЭ будет представлена в виде, показанном на рис. 9, а, где R_{ix}^T, R_{iy}^T - термические сопротивления тела элемента i по координате x и y соответственно; R_{lx}^T - термическое сопротивление тела элемента l по координате x ; R_{ny}^T, R_{gy}^T - термические сопротивления по координате y тела элемента n и g соответственно; R_{il}^C, R_{ig}^C - контактные термические сопротивления (КТС) в соединении элементов i, l и i, g соответственно; R_{ix}^V - термическое сопротивление, связанное с конвекцией с элемента i в воздух по координате x .

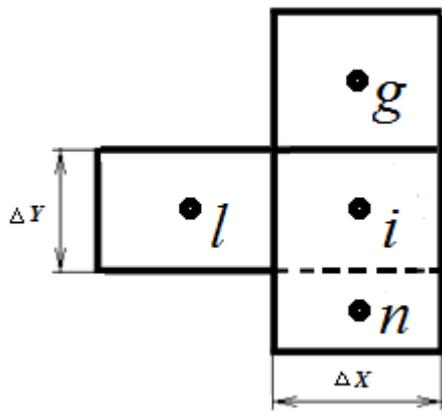


Рис. 8. К определению теплового сопротивления i -ой ячейки тепловой модели

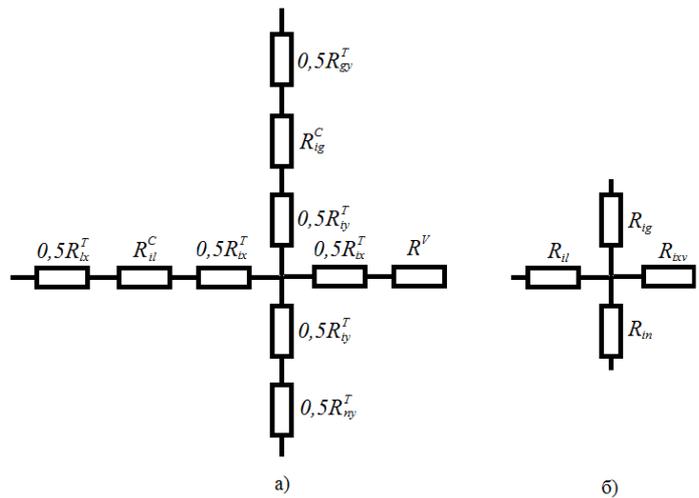


Рис. 9. Ячейка тепловой модели

Воспользовавшись правилами электротепловой аналогии, сопротивления, расположенные последовательно, можно сложить и тогда ячейка тепловой модели будет иметь вид, представленный на рис.9, б, где

$$R_{il} = 0,5R_{lx}^T + R_{il}^C + 0,5R_{lx}^T; \quad R_{ig} = 0,5R_{iy}^T + R_{ig}^C + 0,5R_{iy}^T; \\ R_{in} = 0,5R_{iy}^T + 0,5R_{ny}^T; \quad R_{ixv} = 0,5R_{ix}^T + R_{ix}^V. \quad (3)$$

Для каждого КЭ составлялись уравнения равновесия тепловых потоков в ее узлах, расположенных в геометрических центрах КЭ, аналогичных уравнениям Кирхгофа для разветвлённой электрической цепи. Например, для плоского элемента i на рис. 8 уравнение может быть записано в виде

$$\sigma_{il}(t_l - t_i) + \sigma_{ig}(t_g - t_i) + \sigma_{in}(t_n - t_i) + \sigma_{ixv}(t_v - t_i) = 0, \quad (4)$$

где $t_i; t_l; t_g; t_n$ - температура в узлах $i; l; g; n$ соответственно, °К; t_v - температура воздуха, °К; $\sigma_{il}; \sigma_{ig}; \sigma_{in}$ - полная (абсолютная) термическая проводимость между соответствующими узлами, Вт/°К; σ_{ixv} - полная (абсолютная) термическая проводимость между узлом i и окружающей средой по координате x , Вт/°К;

Значения термических проводимостей между соответствующими узлами находились как обратные величины термических сопротивлений, например: $\sigma_{il} = 1/R_{il}$.

Аналогичным образом, составляются уравнения для узлов 3-D модели.

Для подтверждения адекватности предложенной методики численного моделирования и регрессионной зависимости, описывающей плоский стык в виде псевдослоя при прохождении теплового потока, было проведено сравнение результатов натуральных экспериментов и моделирования экспериментального стенда с помощью крупноблочных конечных элементов.

Модель экспериментальной установки для проведения численного эксперимента с использованием крупноблочных КЭ представлялась в виде соединенных между собой 13-ти прямоугольных параллелепипедов (рис. 10).

Результаты измерения на стенде разницы температур $\Delta t = t_{BX} - t_{ВЫХ}$ (рис. 3) для 6-ти кратных измерений и результаты моделирования, оцениваемые разницей температур в КЭ №1 и №5, приведенные на рис. 11, показали хорошее качественное и количественное совпадение (среднеквадратическое отклонение составило 0,192) и подтвердили адекватность предложенных методик.

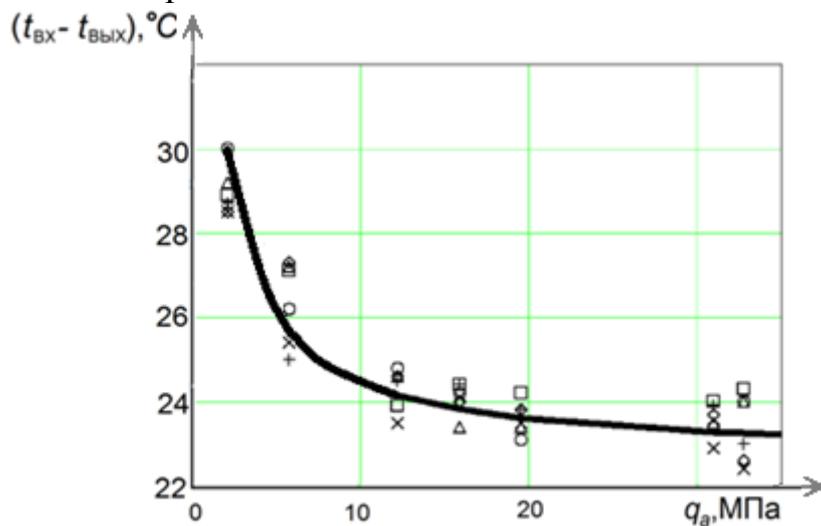
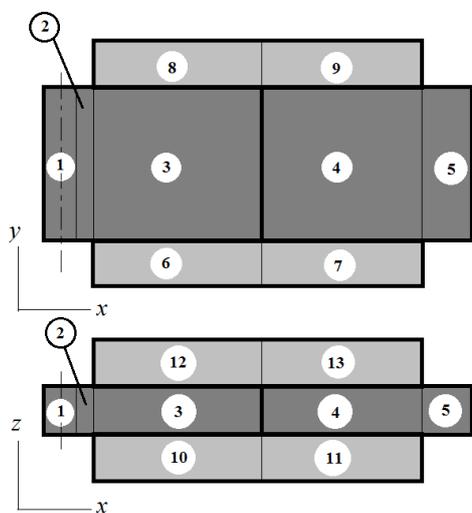


Рис. 10. Моделирование экспериментальной установки с помощью крупноблочных КЭ

Рис. 11. Результаты натуральных измерений (точки) и моделирования (сплошная линия) разницы температур $t_{BX} - t_{ВЫХ}$ в зависимости от усилия сжатия образцов

Пятая глава посвящена разработке конструкторско-технологических решений повышения быстроходности шпиндельных узлов на основании тепловой модели шпиндельного узла в условиях нескольких источников тепловыделения и установлению закономерностей формирования температурных полей.

В соответствии с методикой определения теплового состояния с использованием крупноблочных конечных элементов была разработана тепловая модель осесимметричного шпиндельного узла станка мод. 2440СФ4 в условиях нескольких источников тепловыделения (рис. 13), в качестве которых выступали четыре радиально-упорных подшипника 2-46115 (ГОСТ 831-75).

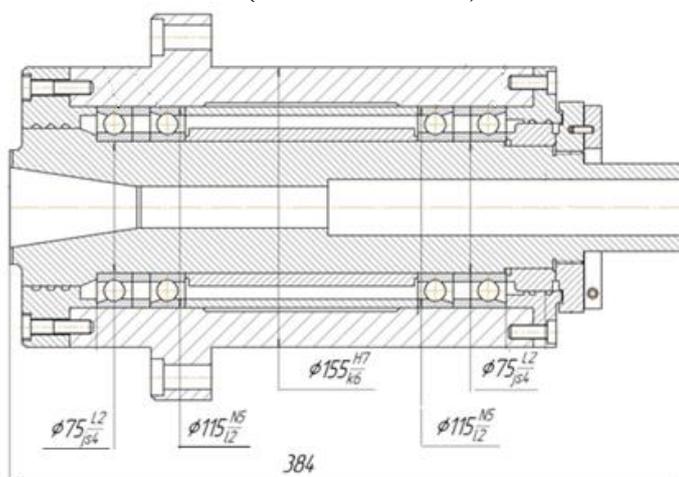


Рис. 13. Шпиндельный узел станка модели 2440СФ4

Так как ограничивающим параметром температурной картины является температура нагрева наружных колец подшипников, то была рассмотрена только гильза ШУ, в которой установлены наружные кольца подшипников.

Решение системы из 36 алгебраических уравнений, являющейся математической моделью распределения температур по 36 КЭ гильзы (рис. 14), осуществлялось с использованием пакета МАТКАД.

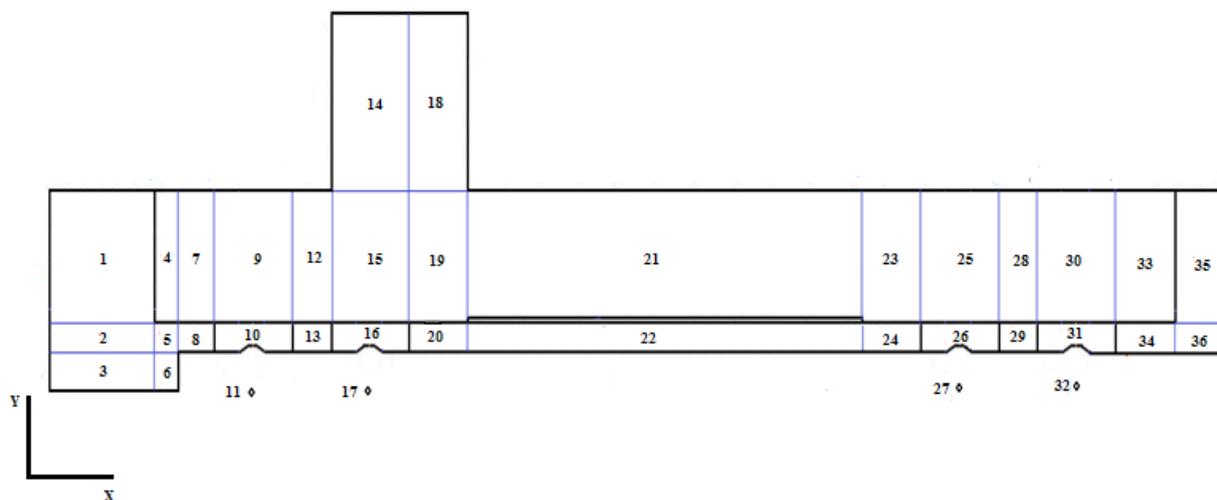


Рис. 14. Конечно-элементная модель гильзы

Эффективность предлагаемых конструкторско-технологических решений (КТР), позволяющих повысить быстроходность ШУ, связанных с увеличением площади наружных теплоотдающих поверхностей, которое может быть реализовано изменением диаметральных размеров гильзы и выполнением на наружной цилиндрической поверхности кольцевых проточек (табл. 1) и со снижением контактных термических сопротивлений путем увеличения давлений в соединениях, обеспечиваемых при сборке, а также снижение параметра R_a (табл. 2), была оценена с использованием разработанной тепловой модели гильзы ШУ станка мод. 2440СФ4.

Таблица 1

Влияние канавок на наружной поверхности гильзы на температуру ШУ

№ КЭ наружных колец подшипников	Температура, °С		
	Гильза с гладкой наружной поверхностью	Гильза с канавками квадратного профиля	Гильза с канавками прямоугольного углубленного профиля
10	28,413	26,996	26,05
16	28,409	26,964	25,999
26	28,774	27,185	26,123
31	28,827	27,248	26,192

Таблица 2

Температура наружных колец подшипников в зависимости от качества контактирующих поверхностей

№ КЭ наружных колец подшипников	$T, ^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{C}$
	при $R_a = 0,63 \text{ мкм}$	при $R_a = 0,32 \text{ мкм}$
10	28,413	27,37
16	28,409	27,358
26	28,774	28,727
31	28,827	28,782

Результат комплексной реализации предложенных конструкторско-технологических решений представлен на рис. 15.

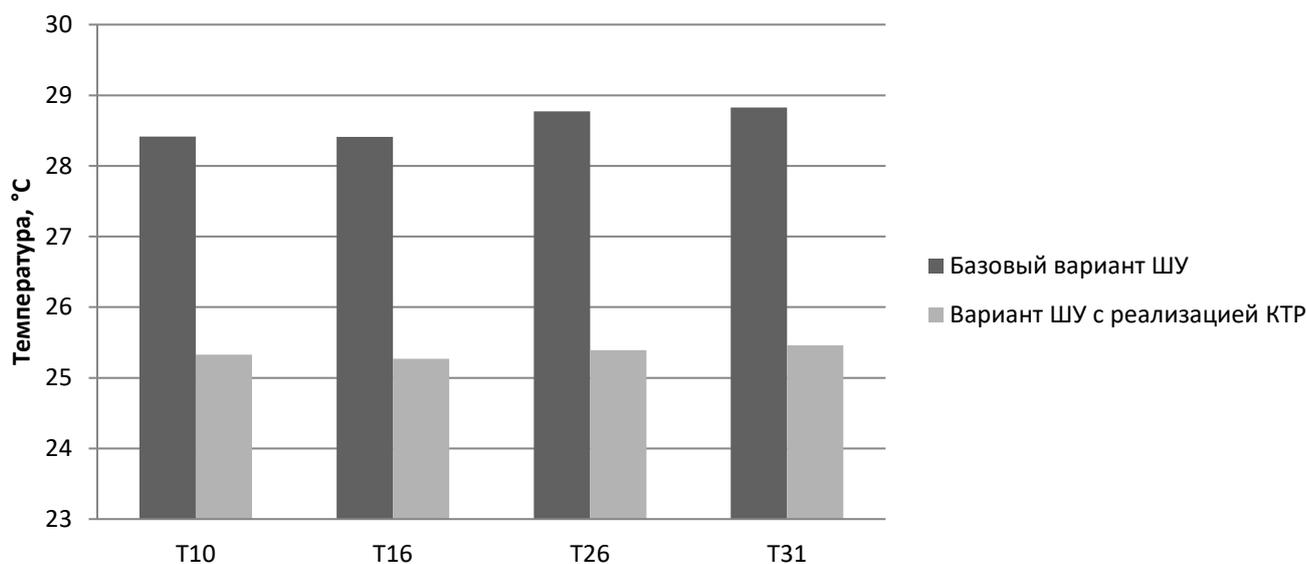


Рис. 15 Сравнение температуры в наружных кольцах подшипников (КЭ №10,16,26,31) станка мод. 2440СФ4 для базового и варианта с реализацией КТР

Таблица 3

Температура наружных колец подшипников ШУ с реализацией КТР

№ КЭ наружных колец подшипников	$T, ^\circ\text{C}$ при $n_{max} = 5000 \text{ об/мин}$ (пластичная смазка)	$T, ^\circ\text{C}$ при $n_{max} = 6300 \text{ об/мин}$ (жидкая смазка)
	10	26,659
16	26,588	28,301
26	26,74	28,493
31	26,824	28,599

Приведенные на рис. 15 значения температур подшипников ШУ с реализацией КТР позволяют увеличить частоту вращения шпинделя с 4000 об/мин (у базового варианта) до 5000 об/мин (максимальная быстроходность подшипников 2-46115 при работе с пластичной смазкой) и до 6300 об/мин (максимальная быстроходность подшипников 2-46115 при работе с жидкой смазкой). Получаемые при

этом температуры подшипников (табл. 3) не превышают значений температурного критерия в 28...30°C.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для определения факторов, оказывающих доминирующие влияющие на контактное термическое сопротивление, разработана плоская численная модель с псевдосредой (состоящий из площадок фактического контакта и полостей, заполненных воздухом или маслом) в зоне контакта и проведен ряд однофакторных экспериментов, в результате которых были выделены следующие значимые факторы: толщина псевдосреды, номинальное давление в контакте; предел текучести контактирующего материала; параметр, определяющий расположение зоны фактического контакта.

2. На основании проведения полнофакторного эксперимента типа 2^4 была разработана регрессионная модель изменения температуры в зоне контакта. ПФЭ подтвердил результаты однофакторных экспериментов, уточнив, что наиболее значимыми из четырех рассматриваемых факторов являются два: толщина псевдосреды и номинальное давление в контакте, которые оказывают доминирующее влияние на КТС. На основании регрессионной зависимости изменения температуры в зоне контакта получено выражение для контактного термического сопротивления псевдосреды.

3. Проведенные натурные эксперименты выявили закономерности влияния конструкторско-технологических факторов на контактное термическое сопротивление плоского стыка. Используемая экспериментальная установка позволила учитывать микроотклонения (шероховатости) и макроотклонения контактирующих поверхностей при изменении давления в стыке от 2 до 40 МПа. Численное моделирование МКЭ экспериментальной установки визуализировало тепловые поля и расширило варьирование исходных данных.

4. Разработана инженерная методика определения распространения тепловых потоков в сборочных единицах с использованием крупноблочных конечных элементов, позволяющая исключить применения сложных специализированных программных продуктов и максимально учесть конструкторско-технологические параметры. Предложенная методика на основании решения системы алгебраических уравнений теплового баланса для узловых точек тепловой модели дает возможность определить температуру в любой точке конструкции.

5. Предложенная инженерная методика была апробирована при разработке 3D тепловой модели экспериментальной установки. Было промоделировано влияние на перепад температуры в зоне контакта усилия сжатия образцов, шероховатости контактирующих поверхностей ($R_a = 0,1...3,2$ мкм); заполнение полостей воздухом или маслом и применение разных марок сталей образцов. Данная методика была применена также при моделировании теплового состояния опоры ШУ.

6. Разработана тепловая модель шпиндельного узла в условиях нескольких источников тепловыделения и установлены закономерности формирования темпе-

ратурных полей. Даны рекомендации по выбору параметров тепловой модели, для плоских и цилиндрических соединений шпиндельного узла.

7. Предложены конструкторско-технологические решения, позволяющие снизить температуры подшипников шпинделя, что дает возможность повысить частоту вращения шпинделя с 4000 об/мин (у базового варианта) до 5000 об/мин (при работе с пластичной смазкой) и до 6300 об/мин (при работе с жидкой смазкой).

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Разработка тепловой модели шпиндельной опоры металлорежущего станка // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2020. Т. 22. № 3(95). - С. 49-55. DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-3-49-55.

2. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Построение регрессионной модели термического сопротивления контактной псевдосреды // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2021.Т. 23. № 3(101). - С. 47-54. DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-3-47-54.

3. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Исследование неполной регрессионной модели термического сопротивления контактной псевдосреды // Транспортное машиностроение. 2023. №6(18). - С. 12-20. DOI: 10.18323/2782-4039-2023-3-65-3

4. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Моделирование контактного термического сопротивления при проектировании технологического оборудования// Frontier Materials & Technologies. 2023. №3. - С. 31-42. DOI:10.18323/2782-4039-2023-3-65-3

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных

5. Denisenko A.F., Podkruglyak L. Yu. Heat model of a spindle support of a precision metal cutting machine // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 971 (2020) 022020. DOI:10.1088/1757-899X/971/2/022020.

6. Denisenko A.F., Grishin R.G., Podkruglyak L. Yu. Simulation of a Contact Pseudo-Environment in Calculating Thermal Resistance// MATEC Web of Conferences 346, 03049 (2021). DOI:10.1051/mateccconf/202134603049.

7. Denisenko A.F., Grishin R.G., Podkruglyak L. Yu. Formation of Contact Thermal Resistance Based on the Analysis of the Characteristics of the Pseudo-Medium// Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer. Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). ICIE 2021, Cham. pp. 221–229. DOI:10.1007/978-3-030-85233-7_26.

Публикации в других научных изданиях

8. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Структура теплового контактного взаимодействия деталей шпиндельного узла металлорежущего станка// Мат. IV меж-

дунар. науч.-практ. конф. «Мехатроника, автоматика и робототехника». Новокузнецк: НИЦ МС, 2020, № 5. - С. 110-116.

9. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Методика экспериментальных исследований контактного термического сопротивления плоских стыков// Мат. XVIII Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием «Высокие технологии в машиностроении», Самара: СамГТУ, 2022. - С. 146-148.

10. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Стенд и метрологическое обеспечение экспериментального определения контактного термического сопротивления плоских стыков// Мат. XIX Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участием «Высокие технологии в машиностроении», Самара: СамГТУ, 2022. - С. 95-98.

11. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Определение значимости факторов при моделировании контактного термического сопротивления // Мат. VII междунар. науч.-практ. конф. «Мехатроника, автоматика и робототехника», Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2023, № 11. - С. 169-172.

12. Подкругляк Л.Ю. Моделирование прохождения теплового потока через плоский стык// «Актуальные проблемы в машиностроении», Новосибирск, 2023, Т. 10, № 1-2. - С. 51-56.

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

14. Денисенко А.Ф., Подкругляк Л.Ю. Определение коэффициентов теплопроводности в соединениях при конечно-элементном моделировании шпиндельных узлов// Всероссийская науч.-практ. конф. с международным участием «Актуальные проблемы станкостроения – 2023 (АПС – 2023)». – Пенза, 2023. - С. 77-82.

Подкругляк Любовь Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ БЫСТРОХОДНОСТИ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА НА
ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕГО ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ**

Автореферат

Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Подписано в печать «_____» _____ 2023 г.

Тираж 100 экз.

Заказ № типография ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический
университет»
(ФГБОУ ВО «СамГТУ»)