

Ш 3833/5

236

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Соколов Александр Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ СОСНОСТИ НА
ТЕПЛОБРАЗОВАНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ
УЗЛОВ

/Специальность 05.02.08 -
технология машиностроения/

Автореферат - диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Соколов Александр Анатольевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТКЛОНЕНИЯ ОТ СОСНОСТИ НА
ТЕПЛОСЪЕДИНЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ ШПИНДЕЛЬНЫХ
УЗЛОВ

/Специальность 05.02.08 -
технология машиностроения/

Автореферат - диссертации
на соискание ученой степени кандидата
технических наук

НТБ МВТУ им. Н. Э. Баумана



1383315

Соколов А. А. Исследование в

Москва

1981



Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Полтавец О.Ф.

Официальные аппоненты – доктор технических наук, профессор
Никифоров А.Д.

– кандидат технических наук, ст.н.с.
Завгородний Ю.П.

Ведущее предприятие – Московский завод координатно-расточных станков (МЗКРС)

Защита диссертации состоится "_____" _____ 1981 г.
на заседании специализированного Совета по технологии машиностроения, шифр К-053.15.15 МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им.
Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан "_____" _____ 1981 г.

Ученый секретарь Совета
к.т.н. доцент

Мещеряков Р.К.

Л-66532 от 14.08.81г. Союз 1.0 п.л. тираж 100 заказ 1150

Типография МВТУ имени Н.Э. Баумана

Актуальность темн. Современный прецизионный станок - это сложное техническое устройство, качество которого определяется многими факторами. Среди них важную роль играют технологические факторы, под влиянием которых формируются качественные показатели изделия на всех этапах его производства. При этом особое место принадлежит сборке, как завершающему этапу производственного процесса.

Большие трудности технологического характера имеют место при сборке наиболее ответственного узла высокоточных станков - шпиндельного узла. Как показывает практика многих станкостроительных заводов, при обкатке шпиндельных узлов, собранных из качественных деталей, часто имеет место их нагрев на $25+30^{\circ}\text{C}$ выше допустимого уровня. Производственные исследования на ряде предприятий показали, что такое явление наблюдается у 20-30% всех шпиндельных узлов.

Внутреннее теплообразование сверх установленной нормы говорит о наличии погрешностей сборки, которые часто проявляются в отклонениях от правильного взаимного расположения основных поверхностей деталей в узле.

Одной из наиболее распространенных погрешностей расположения является отклонение от соосности поверхностей опор шпинделя. Однако его влияние на расположение и интенсивность источников тепловыделений в шпиндельном узле в настоящее время практически не изучено. Это не позволяет расчетным путем определять температурные деформации деталей шпиндельного узла и на этой основе прогнозировать условия их работы. Указанными причинами объясняется и отсутствие технологических рекомендаций по сборке шпиндельных узлов, обеспечивающих их оптимальный температурный режим. Выполнение данной работы позволит определить количественную и качественную связь отклонения от соосности с теплообразованием и температурными деформациями шпиндельных узлов, а также найти пути снижения этих деформаций. Это обуславливает актуальность настоящей работы.

Цель работы. Исследование влияния отклонения от соосности опор шпинделя на теплообразование и температурные деформации высокоточных шпиндельных узлов и разработка методов их уменьшения, в целях повышения надежности изделий - металлорежущих станков.

Методы исследования. Силовая картина в опоре качения с перекошенными кольцами подшипников исследована методами теории контактных деформаций. Математическая модель процесса теплообразования в шпиндельном узле разработана на основе теории теплопередачи с применением метода регулярного режима и преобразования Лапласа. Расчет температурных деформаций произведен на основе теории термоупругости с введением граничных условий.

Экспериментальные исследования проводились на высокоточных шпиндельных узлах, которые монтировались на специально созданной установке, оснащенной современной контрольно-измерительной аппаратурой. Для контроля температурных перемещений рабочего конца шпинделя использовался метод голографической интерферометрии, позволяющей получить результаты с долемикрометрической точностью.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории кафедры "Технология конструкционных металлов" МВТУ им. Н.Э.Баумана, в лаборатории кафедры МЭИ и в условиях действующего станкостроительного предприятия.

Научная новизна. Разработана методика определения количества тепла, выделяющегося в подшипнике, кольца которого установлены с отклонением от соосности. Методика учитывает возникновение в стыках тел и поверхностей качения такого подшипника контактных деформаций и усилий, работа которых превращается в тепло.

Установлена качественная и количественная взаимосвязь отклонения от соосности с температурой и температурными деформациями элементов шпиндельного узла. Выявлен механизм формирования неоднородного теплового поля основных элементов шпиндельного узла под влиянием отклонения от соосности его опор.

Практическая ценность. Результаты работы в виде аналитических зависимостей, графиков, программ для ЭВМ и номограммы могут быть использованы при проектировании и производстве широкой номенклатуры изделий с регламентированным температурным режимом. Применение разработанных методов уменьшения теплообразования и температурных деформаций позволит значительно повысить производительность и качество сборки ответственных узлов с опорами качения. Результаты работы могут быть использованы также при диагностических испытаниях.

Реализация работы. Результаты работы внедрены на производстве и вошли в отраслевой регламент РТМ 2-040-146-80 "Методы испытания и контроля собранных

узлов станков высокой и особо высокой точности", Оргстанкин-пром, 1981г.

Разработанные методы уменьшения теплообразования в шпиндельных узлах позволили в заводских условиях повысить качество выпускаемой продукции – высокоточных станков и дали по одному машиностроительному заводу годовой экономический эффект на сумму 48127 рублей.

Апробация работы. Основные результаты диссертации доложены и одобрены на научных семинарах в МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1977-1981гг., а также опубликованы статьи в журналах. Разработанные технологические методы уменьшения температурных деформаций вошли в промежуточные отчеты по научно-исследовательской теме "Повышение надежности шпиндельных узлов технологическими методами" и опробованы в производственных условиях при сборке шпиндельных узлов станков модели АТ-320.

Объем работы. Диссертация состоит из следующих разделов: введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Изложена на 123 страницах машинописного текста, содержит 10 таблиц, 57 рисунков, список литературы из 64 наименований и два приложения.

Содержание работы

Глава I. Температурные деформации в шпиндельном узле.

Исследования Дальского А.М., Виле В., Корсакова В.С., Карслоу Г, Пинегина С.В., Проникова А.С., Санько Ю.М., Соколова Ю.Н. и ряда других советских и зарубежных ученых показали, что температурные деформации оказывают существенное влияние на ряд важных показателей качества металлорежущих станков. В результате температурных деформаций изменяются размеры и формы поверхностей деталей, так и самих деталей и даже узлов. С точки зрения функционального назначения станка важно то, что изменяются размеры, форма и расположение поверхностей наиболее ответственных его деталей: шпинделя, шпиндельной бабки, стола, станины. Это приводит к снижению надежности и долговечности металлорежущих станков. Поэтому глубокое изучение механизма формирования температурных деформаций и разработка технологических методов их снижения имеет большое практическое значение. И особое значение приобретает проблема температурных деформаций, когда речь идет о наиболее ответственных узлах металлорежущих станков. К ним, в первую

очередь, относится шпиндельный узел. В данном разделе работы рассмотрена классификация шпиндельных узлов по такому признаку, как интенсивность теплообразования в опорах качения, определены основные факторы, влияющие на температурные деформации. По своей природе эти факторы обусловлены или конструктивными особенностями станка, или технологией его изготовления. Практически все конструктивные факторы могут быть исключены или сведены к минимуму за счет использования широкого ряда приемов, рассмотренных в данной работе. В шпиндельном узле они, как правило, приводят к возникновению в опорах дополнительных сил трения, работа которых большей частью превращается в тепло. Следовательно, зона контакта тел и поверхностей качения является одним из источников тепловыделений в работающем шпиндельном узле. Среди технологических факторов одним из наиболее важных является отклонение от соосности опор, которое оказывает существенное влияние на условия работы установленных в опорах подшипников качения. Однако механизм воздействия такого фактора на температурные деформации шпиндельных узлов изучен недостаточно, что не позволяет целенаправленно управлять температурными деформациями технологическими методами.

На основе приведенного анализа и в соответствии с целью работы поставлены следующие задачи исследования:

1. Теоретически исследовать силовую картину опоры шпинделя обусловленную отклонением от соосности поверхностей качения подшипников.
2. Разработать математическую модель теплового поля шпиндельного узла при отклонении от соосности его опор.
3. Теоретически и экспериментально исследовать температурные деформации элементов шпиндельного узла, вызванные отклонением от соосности.
4. Разработать методы уменьшения теплообразования и температурных деформаций шпиндельных узлов с опорами качения и определить их экономическую эффективность от внедрения.

Глава 2. Теоретическое исследование механизма теплообразования и температурных деформаций.

Отклонение от соосности опор шпиндельного узла приводит к взаимному перекосу наружных и внутренних колец подшипника. В стыках тел и поверхностей качения такого подшипника имеют место кон-

тактические деформации.

При этом оси контактирующих колец подшипника и тел качения непараллельны. В этом случае контактные деформации можно характеризовать такими параметрами, как длина контакта, величина упругого сближения контактирующих тел и усилиями, действующими в стыках тела качения — кольца подшипника.

Исследованием установлено, что упругие сближения, а следовательно, и распределение нагрузки по длине контакта тел качения и колец непостоянно. Например, в случае, когда номинальный натяг а подшипнике равен нулю, эти параметры изменяются практически по линейному закону, от нуля до максимального значения. Причем, абсолютная величина упругих сближений и распределенной нагрузки максимальна у тел качения, контактирующих с кольцами подшипника в плоскости перекоса и минимальна — в плоскости, перпендикулярной ей.

В каждом стыке тел качения с кольцами подшипника возникают силы трения, которые пропорциональны равнодействующим распределенной нагрузки. При вращении шпинделя эти силы трения совершают работу, которая превращается в тепло.

Аналитическое определение сил трения, действующих в стыках всех тел и поверхностей качения, дало возможность установить, что количество тепла, выделившееся в подшипниках за счет перекоса колец на угол θ , описывается выражением:

$$Q = \frac{1028}{60} \cdot n \left\{ f_g \cdot 10^{-8} \left(\frac{\sigma \cdot n}{60} \right)^{2/3} (z+R) + f_j 4,2 (z+R) + \right. \\ \left. + \frac{l_1 E}{0,9579} \left\{ \left(\frac{l_p \tan \theta}{4} + \frac{z}{2 \cos \theta} - \frac{z}{2} \right) \cdot [\ln z_p - 4,6 + \ln(0,5 \cdot \right. \right. \\ \left. \left. \times l_1 \cos \frac{\theta}{2}) - \ln(0,5 l_1 \cos \frac{\theta}{2} + z \ln \frac{z_p}{z_p + 0,5 l_1 \cos \frac{\theta}{2}})] + 0,814 \right\} \right\}$$

где: z, R, z_p — радиусы соответственно поверхностей качения внутреннего и наружного колец и тела качения

- n — частота вращения вала
- l_p — длина ролика
- f_g, f_j — коэффициенты, зависящие от типа подшипника
- σ — вязкость смазки
- l_1 — длина контакта тела качения с кольцом подшипника
- E — модуль упругости первого рода

Для определения температуры отдельных элементов узла на основе метода регулярного режима и преобразований Лапласа была разработана математическая модель теплового поля подшипника, кольца которого установлены с отклонением от соосности. Исследование показало, что температура нагрева различных элементов шпиндельного узла неодинакова. Она зависит от координат, которые определяют положение каждого элемента относительно источника тепла, количества стыков между ними, их теплофизических свойств и ряда конструктивных параметров. Реализация математической модели теплового поля в виде программы для ЭВМ позволяет рассчитать среднеинтегральную температуру любого элемента шпиндельного узла.

Под действием нагрева происходит деформация элементов узла в осевом и радиальном направлениях. В силу неодинаковой температуры нагрева, различных теплофизических свойств и размеров элементов их температурные деформации неодинаковы по величине.

Расчет температурных деформаций проводился методами теории термоупругости по усредненной по объему подшипника избыточной температуре, что значительно упростило математический аппарат.

На основании теоретических исследований разработана и реализована программа для машины ES IO-20, позволяющая рассчитывать величины температурных деформаций элементов узла в радиальном и осевом направлениях, определять величину изменения зазор - натяга в подшипнике для различных исходных параметров. Ее использование позволяет также выбирать наиболее оптимальную конструкцию шпиндельного узла с точки зрения температуры нагрева, варьируя одними параметрами при постоянных других.

Расчеты по разработанной программе показали, что отклонение от соосности оказывает существенное влияние на температуру нагрева и температурные деформации элементов шпиндельного узла.

Глава 3. Экспериментальное исследование влияния отклонения от соосности на нагрев и температурные деформации шпиндельного узла.

Цель исследований - проверка и уточнение результатов теоретического исследования. Эксперименты проводились на специальной установке, имитирующей высокоточный шпиндельный узел. Одна из его опор была регулируемой и позволяла создавать требуемую величину отклонения от соосности.

В процессе экспериментов контролировалась температура поверхностей качения опор шпинделя, собственно шпинделя, гильзы и корпусов опор. Температура на поверхностях качения наружных колец подшипников измерялась с помощью хромелькопелиевых термопар. Температура шпинделя, внутренних колец подшипников, гильзы и корпусов контролировалась термоиндикаторами (пигментными термокрасками) типа ТИ и ТП.

Эксперименты подтвердили, что под влиянием нагрева, вызванного отклонением от соосности, имеет место сложный характер температурных деформаций всех элементов шпиндельного узла. Их результатом, в первую очередь, является изменение размеров ответственных поверхностей. Особенно значительное влияние оказывает отклонение от соосности на изменение диаметральных размеров шпинделя в области расположения подшипников. Уже при $\Delta_{\text{тех}} = 6 \text{ мкм}$ приращение диаметрального размера шпинделя у нижней опоры в исследуемом диапазоне частот вращения ($n = 100 - 2000 \text{ мин}^{-1}$) составило $4 + 8 \text{ мкм}$. Изменение диаметральных размеров шпинделя может оказывать значительное влияние на условия его работы, в частности, приращение его диаметральных размеров в зоне подшипника может привести к существенному увеличению натяга.

Температурным деформациям подвержены и корпус опор. Абсолютная величина этих деформаций меньше, чем у шпинделя и гильзы, что подтверждают результаты теоретических исследований. Однако общий характер изменения температурных деформаций корпусов при увеличении отклонения от соосности аналогичен изменению деформаций шпинделя и гильзы.

Экспериментальные исследования подтвердили также существенное влияние отклонения от соосности на осевые деформации шпинделя. Так при частоте вращения $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ они достигли величин 6 мкм, 17,5 мкм и 32,0 мкм при отклонении от соосности соответственно 6 мкм, 12 мкм и 18 мкм.

Температурные деформации, обусловленные отклонением от соосности опор, приводят не только к изменению линейных и диаметральных размеров элементов узла, но и к изменению их взаимного расположения. Экспериментальными исследованиями установлено, что в данном случае имеет место относительное перемещение всех ответственных элементов шпиндельного узла.

Эксперименты подтвердили основной вывод теоретических исследований о том, что интенсивность тепловыделений в подшипнике качения существенно зависит от величины отклонения от соосности.

Различие расчетных и экспериментально полученных температур элементов шпиндельного узла не превышает 11%, рис. 1.

Их несовпадение объясняется рядом допущений, которые были приняты при разработке тепловой модели: отсутствие погрешности форм поверхностей и тел качения, не учитывалось влияние упорного подшипника на тепловыделение в узле и ряд других факторов.

Эксперименты позволили установить, что отклонение от соосности является причиной возникновения неоднородного теплового поля на поверхности качения колец подшипников. Эта неоднородность наблюдается как по ширине, так и по окружности колец. Степень неоднородности увеличивается с ростом отклонения от соосности. При ее величине 18 мкм разность между максимальной и минимальной температурами на поверхности качения наружного кольца подшипника достигает 2°C. Наибольшая температура соответствует зонам наибольших контактных деформаций в стыках тел и поверхностей качения. Как указывалось в теоретическом разделе эти зоны прилегают к плоскости отклонения от соосности.

Неравномерное температурное поле поверхностей качения подшипников наследуется прилегающими элементами узла.

Неравномерность их температурных полей может учитываться условиями теплообвода, конфигурацией элемента и за счет действия других факторов. Так при $\Delta t_{\text{тех}}=0$ и $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ разность температур шпинделя в среднем сечении и у опор колеблется от 2°C до 5°C. По мере увеличения отклонения от соосности эта разница увеличивается. При $\Delta t_{\text{тех}}=18 \text{ мкм}$ температура в средней части шпинделя отличается от температуры у его верхней опоры на 16°C.

Экспериментально установлено, что температурные деформации, обусловленные отклонением от соосности, оказывают существенное влияние на ряд показателей качества шпиндельного узла. В частности наблюдалось, что с ростом отклонения от соосности величина биения увеличивается. При $\Delta t_{\text{тех}}=6 \text{ мкм}$ величина биения в плоскости отклонения от соосности составляет 2,5, для $\Delta t_{\text{тех}}=12 \text{ мкм}$ она достигает 3,5 мкм, а для $\Delta t_{\text{тех}}=18 \text{ мкм}$ - 4,9 мкм.

Методом голографической интерферометрии установлено, что увеличение отклонения от соосности приводит к смещению рабочего конца шпинделя и контрольной оправки. Перемещение рабочего конца шпинделя увеличивается в 1,5 раза при увеличении отклонения от соосности с 5 до 10 мкм. •

Результаты аттестации ответственных поверхностей подшипни-

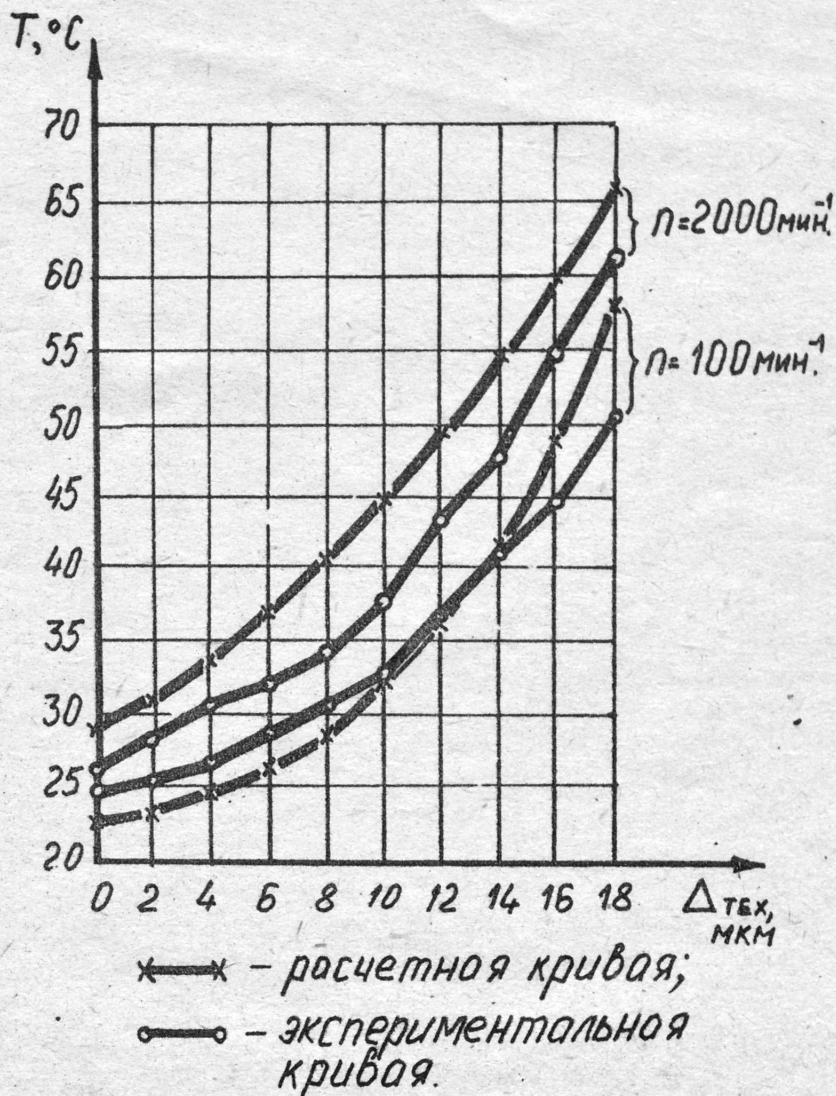


Рис. 1.

ков шпиндельных узлов также служат косвенным подтверждением теоретических предпосылок и расчетных схем.

Так внешний осмотр показал, что на поверхностях качения колец подшипников как верхней, так и нижней опор имеются зоны "пригара" смазки. Эти зоны по своему характеру и расположению соответствуют закону контактных деформаций, которые возникают между телами и поверхностями качения за счет отклонений от соосности. Под действием сил, вызванных отклонением от соосности, наблюдалось пластическое деформирование колец подшипников.

Зафиксировано искажение профиля поверхностей качения колец. Выявлено, что наибольшая его величина имеет место в зоне, прилегающей к плоскости перекоса.

Проведенные исследования подтвердили теоретически установленный факт сложной картины деформаций элементов шпиндельного узла и их влияние на такие его показатели качества, как биение, перемещение рабочего конца шпинделя, ухудшение условий работы подшипников.

Глава 4. Методы уменьшения теплообразования и температурных деформаций.

Исследованиями установлено, что влияние отклонения от соосности проявляется неодинаково в шпиндельных узлах с различным конструктивным оформлением и при различных условиях их работы. Поэтому эффективное обеспечение заданного теплового режима и температурных деформаций может быть обеспечено только комплексом методов, которые следует использовать на стадии конструирования, изготовления и эксплуатации шпиндельного узла. При конструировании важно обоснованно определить основные размерные параметры узла и допуски отклонения от соосности ответственных поверхностей.

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований была разработана номограмма, которая позволяет конструктору правильно решать эту задачу (рис. 2). С ее помощью можно определять величину нагрева подшипника при различных значениях отклонения от соосности $\Delta_{гех}$, межопорного расстояния L , а также величину конечного отклонения от соосности $\Delta_{кон}$, температурное увеличение диаметра $\Delta d_{к.о.}$ оправки на вылете 180 мм и биение оправки на этом же вылете $\delta_{к.о.}$.

При конструировании необходимо учитывать, что в шпиндельном узле могут быть и другие источники тепла, в том числе и такие, природа которых обусловлена не отклонениями от соосности, а дру-

Шпиндель: 2^х опорный; $l_p = 10 \text{ мм}$; $d_{cp} = 80 \text{ мм}$;
 $d_{к.д.} = 30 \text{ мм}$; $l_{к.д.} = 180 \text{ мм}$;
 $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$; натяг - 0 мкм.

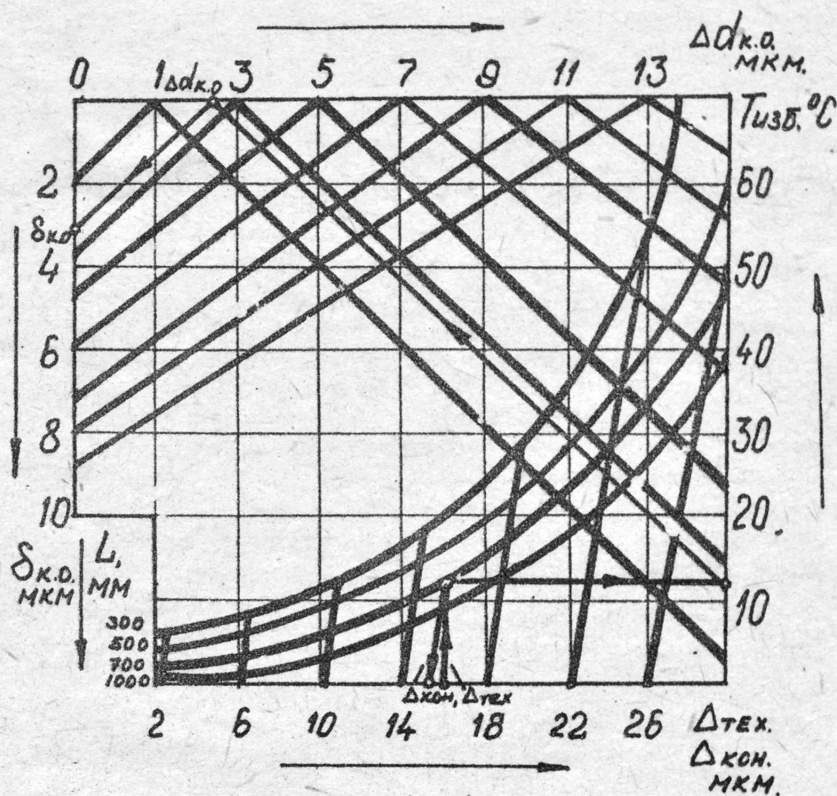


Рис. 2.

гими факторами, например, системой жидкой смазки. Поэтому конструктор может управлять общей тепловой картиной узла или характером теплового поля его ответственных элементов, изменяя взаимное расположение источников тепла или их интенсивность.

Исследования показали, что эффективно воздействовать на характеристику теплового поля и температурные деформации шпиндельного узла можно, используя технологические методы сборки. Так, например, метод взаимной ориентации элементов опор дает возможность управлять отклонением от соосности колец подшипников, установленных с натягом, не ужесточая допусков на изготовление элементов узла.

Установлено, что эффективное воздействие на интенсивность теплообразования в подшипнике, одно из колец которого установлено с зазором, можно осуществить, используя технологические прокладки различной толщины, твердости и конфигурации. Суть метода состоит в введении в торцевой стык перекошенного кольца подшипника технологических прокладок, создающих опрокидывающий момент, который приводит к уменьшению величины перекоса.

Анализ теоретических зависимостей и экспериментальных данных показал, что тепловое поле опоры шпиндельного узла неравномерно (осесимметрично). Это приводит к искажению формы поверхностей и взаимного расположения элементов узла, что в конечном счете сказывается на его надежности и долговечности. В связи с этим был разработан метод, позволяющий сбалансировать тепловое поле на основе управления тепловыми потоками. Для этого, расчетом по результатам аттестации или на основании контрольных замеров, определяются направления наибольших и наименьших тепловых потоков в зоне расположения подшипника. В стыке двух деталей в зоне наименьшего или наибольшего теплового потока наносится термоизолятор (например, свинцово-графитовая смазка). Выбор зоны нанесения термоизолятора зависит от того, которая из сопряженных деталей должна иметь равномерное тепловое поле, а следовательно, и равномерное поле температурных деформаций.

В результате, отвод тепла из одной детали в другую, в этом направлении, уменьшается. Таким путем можно добиться повышения температуры определенной детали в данной зоне и выравнивания температурного поля всего узла.

Производственная проверка и внедрение разработанных методов и рекомендаций показало их высокую экономическую эффективность—48127 руб.

Общие выводы

1. В результате теоретических и экспериментальных исследований описан механизм теплообразования в подшипнике качения, кольца которого установлены с отклонением от соосности, и определены температурные деформации элементов шпиндельного узла.

2. Отклонение от соосности колец подшипников приводит к возникновению в стыках тела качения — поверхности качения сил трения, работа которых превращается в тепло. Такой подшипник является источником тепла, интенсивность которого зависит от величины отклонения от соосности. Для высокоточных шпинделей увеличение отклонения от соосности с 6 мкм до 12 мкм приводит к увеличению температуры опоры шпинделя в два раза.

3. Исследование теплового поля шпиндельного узла и его элементов показало, что оно имеет неравномерный характер. Причем, степень неравномерности определяется величиной отклонения от соосности. Особенно большая неравномерность наблюдается у элементов, которые расположены вблизи источников теплообразования. Неравномерность температуры шпинделя и корпуса в отдельных точках составляет до 70%.

4. Установлено, что повышение температуры нагрева элементов шпиндельного узла и ее неравномерность приводят к температурным деформациям, которые проявляются в изменении размеров, формы и взаимного расположения ответственных элементов шпиндельного узла.

5. Температурные деформации, обусловленные отклонением от соосности, увеличивают осевое и радиальное биения шпинделя; происходит смещение рабочего кольца оправки шпинделя.

6. Установлено, что борьба с температурными деформациями должна вестись комплексно, с помощью конструкторских и технологических мероприятий, которые направлены не только непосредственно на снижение величины температурных деформаций, но и на уменьшение величины отклонения от соосности колец подшипника.

Разработанный технологический метод направленного теплового потока позволяет выравнивать температурное поле узла в целом.

7. Экспериментальная и производственная проверка предложенных в работе технологических методов снижения температурных деформаций подтвердила технико-экономическую эффективность. Эти методы могут быть использованы для широкого круга изделий

с опорами на подшипниках качения, для которых важен заданный эксплуатационный температурный режим.

8. Результаты работы в виде зависимостей, графиков, номограммы могут быть использованы при конструировании, изготовлении и эксплуатации шпиндельных узлов на опорах качения.

9. Экономическая эффективность применения разработанных технологических методов снижения величины температурных деформаций шпиндельных узлов с отклонением от соосности в опорах шпинделя составляет только на одном станкостроительном заводе - 48127 рублей в год.

Результаты работы использованы в отраслевом РТМ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Технологический регламент РТМ 2-040-146-80 " Методы испытания и контроля собранных узлов станков высокой и особо высокой точности, Оргстанкинпром, 1981г.

2. Соколов А.А., Катинас Л.К. Технологические методы снижения нагрева шпиндельных узлов при обкатке, в сб. "Технология производства, научная организация труда и управления". № 2, 1980, М. стр. 10-12.

3. Соколов А.А. Влияние отклонения от соосности на силовую картину и температурные деформации шпиндельного узла повышенной точности, в сб. "Технология машиностроения для легкой и пищевой промышленности и бытовых приборов", № 12, 1981г.