

На правах рукописи

Захаров Олег Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОФИЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ**

Специальности: 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки
05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Саратовский
государственный технический университет»

Научный консультант – доктор технических наук, профессор
Бржозовский Борис Максевич

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор
Денисенко Александр Федорович
доктор технических наук, профессор
Дмитриев Борис Михайлович
доктор технических наук, профессор
Королев Альберт Викторович

Ведущая организация – ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский институт
машиностроения (ЛМЗ – ВТУЗ)»

Защита состоится 20 октября 2010 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.242.02 при ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» по адресу: 410054, г. Саратов, Политехническая ул., 77, СГТУ, корп. 1, ауд. 319.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет».

Автореферат разослан ____ сентября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. А. Игнатьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Надежность машин и механизмов во многом определяется надежностью опор качения. В практике мирового машиностроения происходит постоянное ужесточение требований к качеству изделий. Поэтому актуальна проблема повышения эксплуатационных характеристик подшипников качения, которые решающим образом зависят от точности геометрической формы и качества рабочих поверхностей их деталей. Увеличение долговечности опор качения связано с оптимизацией рабочих поверхностей деталей, образующая которых конструктивно формируется сочетанием различных линий, в том числе кривых переменной кривизны.

Заключительные этапы технологического процесса, как правило, связаны с использованием абразивной обработки. Методы бесцентрового шлифования и суперфиниширования получили широкое применение при изготовлении тел вращения благодаря высокой производительности и возможности полной автоматизации при более сложной наладке. После операции шлифования вводят суперфиниширование с целью уменьшить отклонения формы, волнистость и шероховатость поверхности.

Наибольший эффект обеспечивает взаимосвязанная модификация профиля дорожек качения колец и профиля роликов, что подтверждается исследованиями отечественных и зарубежных ученых. В качестве технологической базы при изготовлении роликов используется собственно обрабатываемая поверхность, а при изготовлении колец – также предварительно шлифованная поверхность бортов. Поэтому операции бесцентрового шлифования с продольной подачей (на проход), шлифования на неподвижных опорах (врезанием) и суперфиниширования образуют неразрывный цикл обработки. Кроме того, всем им свойственны общие геометрические закономерности процесса формообразования. Поэтому проблему технологического обеспечения качества необходимо решать в единой взаимосвязи указанных процессов.

Повышение точности бесцентровой абразивной обработки, включающей в первую очередь процессы шлифования и суперфиниширования, имеет ряд особенностей. Во-первых, осуществляется силовое замыкание контакта, и съем припуска зависит как от траектории перемещения заготовок, так и от стабильности их вращения и скорости продольной подачи. Во-вторых, характерно наследование геометрии заготовок с предшествующих операций. В-третьих, на детерминированные факторы процесса формообразования накладываются стохастические, которые при образовании отклонений формы заготовок проявляются в большей степени. При изготовлении прецизионных деталей, таких как детали подшипников качения, наибольшие трудности вызывает стабильное обеспечение точности формы поверхностей как в продольном, так и поперечном сечениях.

За последние годы в отечественной промышленности получены новые результаты в исследовании динамики шлифования, проектировании абразивного инструмента, создании систем автоматизированного управления. Однако до сих пор недостаточно внимания уделено комплексному подходу к обеспечению точности на этапах проектирования и эксплуатации технологического оборудования на основе детерминированных моделей, описывающих геометрические, кинематические и силовые параметры формообразования. Не до конца решены задачи профилирования при изготовлении роликов подшипников с бомбинированными и модифицированными поверхностями. Кроме того, детерминированные модели лишь в первом приближении отражают реальные процессы, а дальнейшее повышение степени их адекватности связано с учетом стохастических факторов. Построение единой методологии требует обоснования системы критериевальных оценок качества процесса формообразования и использования формализованных методов оптимизации.

Указанные трудности в настоящее время сдерживают повышение точности и ограничивают рациональное профилирование рабочих поверхностей деталей подшипников качения на операциях бесцентровой абразивной обработки. Поэтому перспективным направлением следует считать обоснование и реализацию методологии обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения.

Цель работы – обоснование и реализация методологии обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения на операциях бесцентровой абразивной обработки, основывающейся на оптимизации геометро-кинематических параметров при проектировании и наладке технологического оборудования по детерминированным и стохастическим моделям.

Методы и средства исследований. Работа базируется на основных положениях теорий резания и формообразования, технологии машиностроения, теории огибающей, теории машин и механизмов, а также разделах теоретической механики, аналитической и дифференциальной геометрии, векторной алгебры, теории вероятности и математической статистики.

В теоретических исследованиях использованы численные методы анализа, аналитическое и статистическое моделирование, гармонический анализ, критериальная и параметрическая оптимизация.

Экспериментальные исследования проведены в лабораторных и производственных условиях с использованием компьютеризированных измерительных систем и на основе планирования и обработки результатов методами математической статистики.

Научная новизна работы. Решена актуальная научная проблема – обеспечение качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения при бесцентровой абразивной обработке с помощью научно обоснованной методологии, включающей совокупность методов, средств и математических моделей, на основе **новых научных результатов:**

- выявлены закономерности образования погрешностей формы поверхностей деталей подшипников при бесцентровой абразивной обработке в результате нарушения траекторий относительного движения инструмента и заготовок, возникающих вследствие погрешностей элементов формообразующей подсистемы станка, нестабильного базирования и технологического наследования;
- обоснована методология обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения на основе оптимизации геометро-кинематических параметров формообразования по детерминированным и стохастическим моделям;
- создана система критериальных оценок точности обработки через параметры наладки оборудования, включающая: результирующий вектор отклонений формообразующей траектории, приведенную погрешность базирования, статистические коэффициенты исправления формы заготовок;
- обоснована методика оптимальной наладки технологического оборудования на основе моделирования методом Монте-Карло по критериям приведенной погрешности базирования и статистических коэффициентов исправления формы заготовок в партии;
- разработаны геометрические, кинематические и силовые модели формообразования на шлифовальных и суперфинишных станках, работающих на проход и врезанием, позволившие исследовать влияние различных схем базирования на точность обработки;
- обоснованы и развиты методы контроля погрешностей формы прецизионных деталей на основе гармонического анализа; создана информационная база для статистической идентификации составляющих погрешностей в партиях заготовок.

Практическая ценность работы. По результатам проведенных исследований разработаны:

- методики профилирования и правки ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков и валков бесцентровых суперфинишных станков с продольной подачей для обработки цилиндрических, конических, бомбинированных и модифицированных поверхностей;
- методики, алгоритмы, программное обеспечение и базы данных для оптимальной наладки оборудования при обработке партий заготовок по статистическим показателям;
- практические способы реализации оптимальной наладки бесцентровых шлифовальных и суперфинишных станков, обеспечивающие стабильность кинематических и силовых параметров в процессе обработки;
- методики обработки данных и программное обеспечение для измерения отклонения от круглости на кругломерах и призмах на основе гармонического анализа, обеспечивающие повышение производительности контроля деталей.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены на следующих предприятиях: ОАО «Саратовский подшипниковый завод», ОАО «Завод авиационных подшипников», ОАО «Тантал», ЗАО «Тантал – EOC Normalien», ОАО «НИТИ-Тесар», ЗАО «Станкошлиф».

Результаты работы используются в учебном процессе на кафедре «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» СГТУ. Издано 4 учебных пособия и 5 методических указаний общим объемом 42 п.л.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы доложены на научно-технических конгрессах, конференциях и симпозиумах международного и российского уровней, в том числе: «Конструкторско-технологическая информатика» (Москва, 2000, 2005), «Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве» (Н. Новгород, 2000), «Комплексное обеспечение показателей качества транспортных и технологических машин» (Пенза, 2000), «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы» (Волжский, 2000 – 2006), «Автоматизация и информатизация в машиностроении» (Тула, 2000), «Качество машин» (Брянск, 2001), «Измерение, контроль, информатизация» (Барнаул, 2001, 2004), «Надежность и качество» (Пенза, 2001, 2002), «Аэрокосмические технологии и образование на рубеже веков» (Рыбинск, 2002), «Актуальные проблемы электронного приборостроения и машиностроения» (Саратов, 2002), «Высокие технологии в машиностроении» (Самара, 2002 – 2005), «Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права» (Москва, 2002 – 2005), «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства» (Волгоград, 2003), «Фундаментальные и прикладные проблемы технологии машиностроения» (Орел, 2002, 2003), «Динамика технологических систем» (Саратов, 2004), «Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла» (Брянск, 2005), «Повышение качества продукции и эффективности производства» (Курган, 2006), «Автоматизация технологических процессов и производственный контроль» (Тольятти, 2006), «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2008), «Проблемы качества машин и их конкурентоспособности» (Брянск, 2008), «Инновации, качество и сервис в технике и технологиях» (Курск, 2009), «Совершенствование техники, технологий и управления в машиностроении» (Саратов, 2009).

Работа в целом обсуждена на заседании кафедры «Конструирование и компьютерное моделирование технологического оборудования в машино- и приборостроении» СГТУ, заседании кафедры «Станки» МГТУ «Станкин», заседании кафедр «Технология машиностроения» и «Металло-режущие станки и инструменты» УлГТУ, заседании научно-исследовательской лаборатории ИМАШ им. А.А. Благоднарова РАН, научно-техническом совещании ОАО «Саратовский подшипниковый завод», выездном

заседании Головного совета «Машиностроение» Министерства образования и науки РФ.

Публикации. По теме диссертации опубликована 121 научная работа, из них 38 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для докторских диссертаций, а также 3 монографии, 13 патентов на изобретения и полезные модели.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 185 наименований и приложений; содержит 375 страниц текста, 136 рисунков, 61 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель работы, научная новизна, указаны положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены результаты анализа конструктивных разновидностей подшипников качения, методов профилирования и средств обеспечения точности при бесцентровой абразивной обработке, сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Фундаментальные труды в области обеспечения качества и технологии машиностроения выполнены Б. М. Базровым, Б. С. Балакшиным, А. С. Васильевым, А. М. Дальским, А. Е. Древалем, Д. Г. Евсеевым, А. В. Королевым, В. С. Корсаковым, И. В. Крагельским, Е. Н. Масловым, А. А. Маталиным, А. Н. Резниковым, Э. В. Рыжовым, А. П. Соколовским, А. Г. Сусловым, В. Л. Худобиным.

Вопросы формообразования поверхностей резанием и проектирования технологического оборудования рассмотрены в работах В. Ф. Безъязычного, Б. М. Бржозовского, В. В. Бушуева, Г. Н. Васильева, В. Л. Вейца, Г. И. Грановского, В. А. Гречишникова, Ю. М. Зубарева, В. А. Кудинова, А. А. Кутина, С. И. Лашнева, Ф. Л. Литвина, В. В. Погораздова, А. С. Проникова, А. Ф. Прохорова, В. Э. Пуша, И. Б. Челпанова, Б. И. Черпакова.

Бесцентровое шлифование исследовано научными школами ЭНИМС и ВНИИПП. Значительный научный вклад внесли Я. М. Ашкиназий, С. Д. Вайс, И. Б. Колтунов, В. Л. Романов, В. П. Филькин. Проектированием и производством станков занимаются Московский СКБ автоматических линий и специальных станков, Санкт-Петербургский завод прецизионного станкостроения, Витебский станкостроительный завод «Вистан». Наиболее известны работы И. Д. Гебеля, А. А. Зыкова, А. П. Капеля, З. И. Кремня, Г. Б. Лурье, В. Н. Мазальского.

Анализ конструкций подшипников качения показал, что рациональное профилирование роликов и дорожек колец подшипников позволяет существенно повысить их эксплуатационные характеристики. Профилиро-

вание фасонных поверхностей дорожек качения колец, как правило, осуществляется на шлифовальных станках с неподвижными опорами. Базой при этом служат цилиндрические борты, полученные предварительно на бесцентровых круглошлифовальных станках. На данной операции наибольшие трудности вызывает достижение малых значений отклонения от круглости, которое отличается значительной нестабильностью в партиях деталей. Наладка станков по стандартным методикам не учитывает явление технологического наследования отклонений формы и часто не обеспечивает требуемой точности обработки.

Несмотря на широкое внедрение конических, бомбинированных и модифицированных рабочих поверхностей роликов до настоящего времени недостаточно теоретически обосновано профилирование ведущих кругов шлифовальных станков и валковой системы суперфинишных станков с продольной подачей. Нетривиальной технологической задачей в условиях подшипниковых заводов также является изготовление строго рассчитанных валков суперфинишных станков.

На основе вышеизложенного сформулированы следующие *задачи исследований*:

- 1) обосновать методологию обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения на основе оптимизации геометро-кинематических параметров формообразования;
- 2) на основе статистического моделирования выявить закономерности образования погрешности формы заготовок в партии;
- 3) создать математические модели профилирования и правки ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков и формообразования валков бесцентровых суперфинишных станков;
- 4) разработать методики наладки технологического оборудования на основе статистического моделирования формообразования партий заготовок;
- 5) исследовать кинематические и силовые параметры при бесцентровом шлифовании и суперфинишировании, установить их взаимосвязь с параметрами наладки станков;
- 6) разработать практические способы реализации оптимальной наладки бесцентровых шлифовальных и суперфинишных станков;
- 7) обосновать методы обработки данных при измерении отклонения от круглости на основе гармонического анализа;
- 8) выполнить экспериментальные исследования для формирования базы данных для статистического моделирования;
- 9) обеспечить промышленное испытание и внедрение результатов исследований.

Во второй главе обоснована методология обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей подшипников качения на операциях бесцентровой абразивной обработки.

На основании анализа особенностей технологических процессов бесцентровой абразивной обработки установлено следующее:

- геометро-кинематические факторы вносят в погрешность обработки до 30 % при бесцентровом шлифовании и до 50 % при суперфинишировании рабочих поверхностей деталей подшипников;
- геометрические, кинематические и силовые параметры процесса формообразования взаимосвязаны и должны рассматриваться комплексно;
- бесцентровая абразивная обработка отличается высшей степенью технологического наследования по отклонению формы заготовок;
- при наладке технологического оборудования необходимо учитывать стохастический характер геометрических параметров в партии заготовок.

С учетом изложенных особенностей обоснована методология исследований (рис. 1), в основе которой лежит общий подход, включающий совокупность методов и средств обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качества, которые исследуют в едином комплексе:

- геометро-кинематические параметры формообразования при проектировании и наладке технологического оборудования;
- погрешности базирования с учетом технологического наследования геометрических отклонений формы заготовок;
- стохастический характер геометрических параметров в партии заготовок.

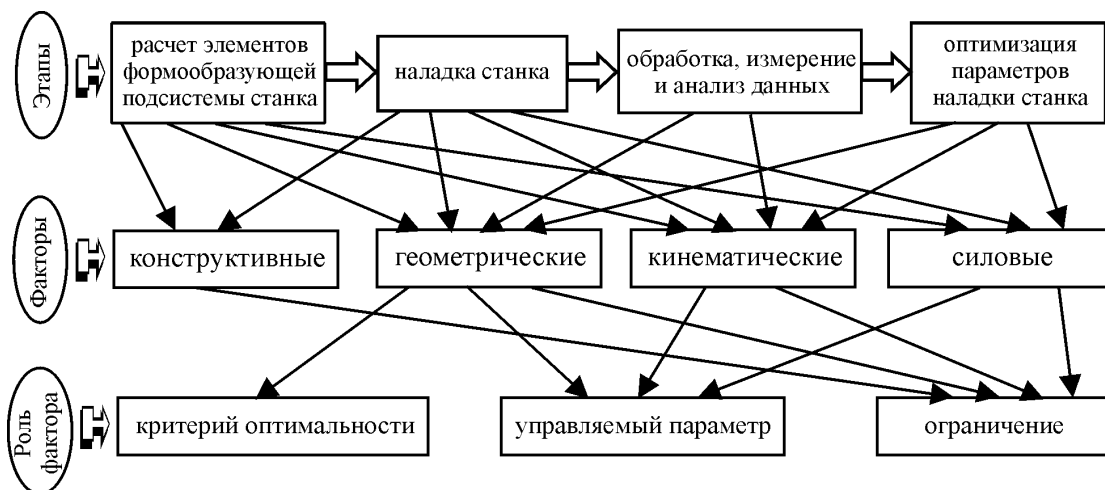


Рис. 1. Схема обеспечения качества профилирования при бесцентровой абразивной обработке

Обоснована система критериальных оценок точности обработки через параметры наладки оборудования, включающая: результирующий вектор отклонений формообразующей траектории, приведенную погрешность базирования, статистические коэффициенты исправления формы загото-

вок. Результирующий вектор отклонений траектории заготовок относительно инструмента определяется по детерминированным геометрическим моделям с учетом погрешностей изготовления элементов формообразующей подсистемы станка и точности установки наладочных параметров. Приведенная погрешность базирования представляет собой безразмерный коэффициент, показывающий отношение среднеарифметического значения мгновенных погрешностей базирования при перемещении заготовки к отклонению формы заготовки, вызывающей эту погрешность. Статистические коэффициенты исправления формы заготовок (как правило, среднеарифметическое значение и среднеквадратическое отклонение) формируются на основании экспериментальных данных или в результате моделирования методом Монте-Карло.

При оптимизации технологического процесса в качестве выходного параметра, формирующего целевую функцию, выбирается максимумный критерий. Другие из указанных критериев переходят в разряд ограничений задачи и по ним вводится запас работоспособности.

Задача обеспечения точности решается на этапах проектирования, наладки станков, обработки, измерения и подналадки станков на основе оптимизации. При наладке технологического оборудования на обработку партий заготовок возникает необходимость в учете стохастического характера некоторых параметров моделей. Для решения подобных задач обосновано применение метода статистического моделирования, также называемого методом Монте-Карло.

Результаты исследований заключаются в обосновании методологии, включающей необходимые методы и средства обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения.

В третьей главе рассмотрены вопросы профилирования и правки ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков при обработке цилиндрических, конических и бомбинированных поверхностей с учетом принципа линейного касания заготовки и базирующих элементов станка.

Обоснованы основные принципы профилирования, заключающиеся в следующем:

- профиль обрабатываемой детали однозначно формируется траекторией ее движения относительно производящей поверхности шлифовального круга;
- ведущий, шлифовальный круги и опорный нож должны иметь постоянный линейный контакт с заготовкой;
- поверхность ведущего круга рассчитывают с учетом формы заготовки, ее относительного движения и принятых наладочных параметров шлифовального станка.

Расчет профиля ведущих кругов шлифовальных станков базируется на основных положениях теории огибающих и численных методах профилирования. Поверхность ведущего круга определена как геометрическое

место линий контакта с заготовкой с помощью векторно-матричных преобразований координатных систем и кинематического условия касания. При расчете переходных поверхностей используются численные методы.

Уравнения поверхности ведущего круга для обработки цилиндрических поверхностей (рис. 2 а):

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= -r(\sin \vartheta \cos \alpha + \cos \vartheta \sin \alpha \sin \beta) + z \sin \alpha \cos \beta + h; \\ Y_2 &= r \cos \vartheta \cos \beta + z \sin \beta + e; \\ Z_2 &= r(\sin \vartheta \sin \alpha - \cos \vartheta \cos \alpha \sin \beta) + z \cos \alpha \cos \beta; \\ \operatorname{tg} \vartheta &= \frac{z \operatorname{tg} \alpha \sec \beta + h}{-e - z \sec \alpha \operatorname{tg} \beta}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r – радиус заготовки; ϑ , z – криволинейные координаты поверхности заготовки; e – кратчайшее расстояние между осями заготовки и ведущего круга; α , β – проекции угла поворота ведущего круга на горизонтальную и вертикальную плоскости станка соответственно; h – наладочный параметр станка, отражающий вертикальное положение заготовок.

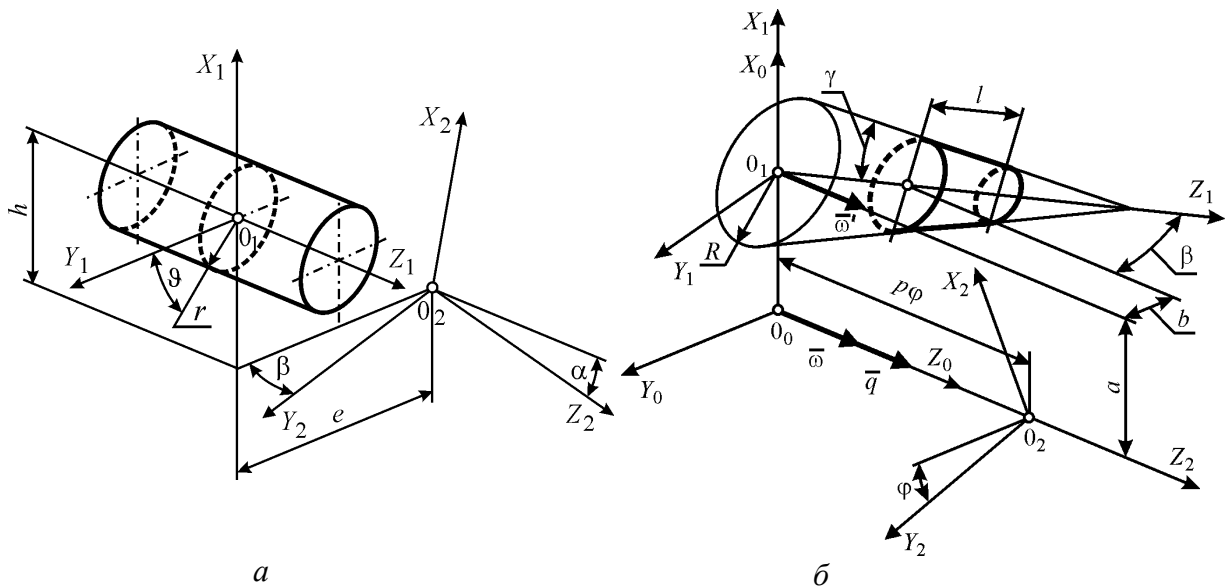


Рис. 2. Схема профилирования ведущего круга при шлифовании цилиндрических (а) и конических (б) поверхностей

Рассчитанная по выражениям (1) поверхность ведущего круга – квазигиперболоидная. Увеличение расстояния h и уменьшение угла α способствуют созданию более рациональной формы ведущего круга с меньшей кривизной профиля.

При бесцентровом шлифовании конических поверхностей заготовка совершает винтовое движение и базируется по образующей конической поверхности параллельно оси шлифовального круга (рис. 2 б).

Относительное движение заготовки и ведущего круга в системе координат станка S_0 задано скользящим вектором угловой скорости $\bar{\omega}$, свободным вектором поступательного движения $\bar{q} = \rho \bar{\omega}$ и вектором-моментом $\bar{m}(\omega) = \bar{R}_0 \times \bar{\omega}$.

Уравнения осевого сечения винтовой поверхности ведущего круга для обработки конических поверхностей:

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= (u \sin \gamma \cos \vartheta + a) \cos \varphi + E \sin \varphi; \\ Z_2 &= u \sin \gamma \sin \vartheta \sin \beta + (R \operatorname{ctg} \gamma - u \cos \gamma) \cos \beta - b / \operatorname{tg} \beta - p \varphi; \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{E}{u \sin \gamma \cos \vartheta + a}; \\ (C - D) \operatorname{tg}^2 \frac{\vartheta}{2} + 2 \cos \gamma (a \cos \beta + p \sin \beta) \operatorname{tg} \frac{\vartheta}{2} + C + D &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где u, ϑ – криволинейные координаты поверхности заготовки; γ – угол образующей конуса заготовки; R – радиус основания продолженного конуса; r – радиус основания заготовки; β, a – угол перекрещивания и кратчайшее расстояние между осями заготовки и ведущего круга; b – наладочный параметр станка; p, φ – шаг и угловой параметр винтового движения;

$$C = (p \cos \beta - a \sin \beta) \sin \gamma; \quad E = u(\sin \vartheta \sin \gamma \cos \beta - \cos \gamma \sin \beta) - R \operatorname{ctg} \gamma \sin \beta;$$

$$D = (R \operatorname{ctg} \gamma \cos \gamma - u) \sin \beta.$$

Типичный осевой профиль нелинейчатой винтовой поверхности ведущего круга, рассчитанный по формулам (2), имеет криволинейную вогнутую форму со стрелой прогиба порядка 0,001 мм. Получены уравнения переходных поверхностей ведущего круга, сформированных окружностями сопряжения конической поверхности и основания заготовки, как след круговинтовых линий на основе численного алгоритма решения.

При шлифовании бомбинированной поверхности формообразующая траектория представляет собой дугу окружности радиуса R_1 , к которой ось заготовки является касательной (рис. 3).

Уравнения поверхности ведущего круга для обработки бомбинированных поверхностей:

$$\left. \begin{aligned} X_2 &= -r \sin \vartheta \cos \tau - Q \sin \tau + a; \\ Y_2 &= -r \cos \vartheta \cos \rho + l \sin \rho + R_1 (\cos \rho - 1) + b; \\ Z_2 &= -r \sin \vartheta \sin \tau + Q \cos \tau; \\ l &= \frac{\cos \rho (R_1 \operatorname{tg} \vartheta + a) - \operatorname{tg} \vartheta (\cos 2\tau + b) + \operatorname{tg} \tau \sin \rho}{\operatorname{tg} \tau + \operatorname{tg} \vartheta \sin \rho}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где τ – угол поворота ведущего круга; ρ – независимый угловой параметр; R_1 – радиус траектории движения заготовки; a, b – наладочные параметры станка; l – длина заготовки; $Q = (r \cos \vartheta - R_1) \sin \rho + l \cos \rho$.

Для расчета профиля ведущего круга, который задан цилиндрическими координатами (Z_2, R_2) , использован оригинальный численный метод решения, заключающийся в организации вложенных циклов для нахождения минимального радиуса R_2 ведущего круга в заданной торцевой плоскости $Z_2 = Z_i$.

Профиль круга для роликов с модифицированной рабочей поверхностью, состоящей из нескольких кривых, рассчитывается как состоящий из отдельных участков, соответствующих кривым на профиле ролика.

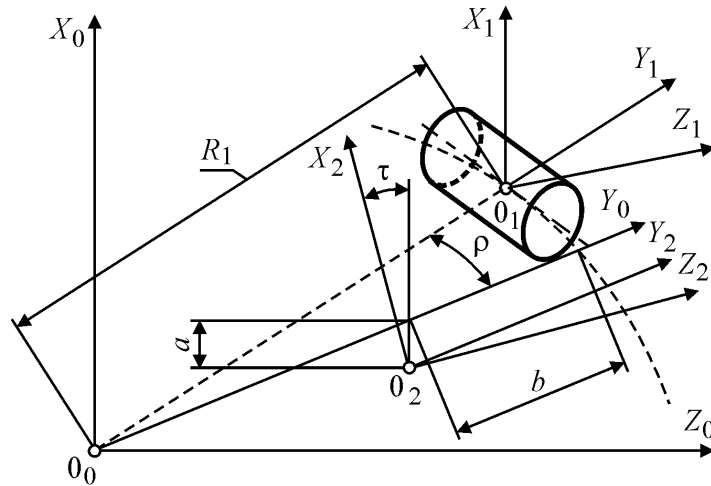


Рис. 3. Профилирование круга при шлифовании бомбинированных поверхностей

При традиционном способе правки алмазный инструмент движется прямолинейно под углом к оси ведущего круга. Уравнения поверхности круга, получаемой при правке алмазом в виде сферы с радиусом r_0 :

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -r_0 \sin \delta \cos \eta + z_0 \sin \eta + A; \\ Y_1 &= r_0 \cos \delta \cos \mu - (r_0 \sin \delta \sin \eta + z_0 \cos \eta) \sin \mu - B; \\ Z_1 &= r_0 \cos \delta \sin \mu + (r_0 \sin \delta \sin \eta + z_0 \cos \eta) \cos \mu; \\ \operatorname{tg} \varphi &= \frac{A \cos \mu + z_0 \operatorname{tg} \eta}{B \cos \mu + z_0 \sin \mu}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где δ, z_0 – криволинейные координаты поверхности алмаза; η, μ – проекции угла перекрещивания оси ведущего круга и траектории алмаза на горизонтальную и вертикальную плоскости; A, B – вертикальное и горизонтальное наладочные смещения.

Методика оптимизации наладочных параметров A, B, η, μ заключается в наилучшем приближении получаемого при правке профиля $(Z_1; R_1)$ к расчетному $(Z_2; R_2)$ в заданном числе n сечений:

$$F(\mu, \eta, A, B) = \sum_{i=1}^n (R_{2i} - R_{1i})^2 \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для минимизации одномодальной целевой функции F (5) применен метод Хука-Дживса. Исследования показали, что схемы с поворотом копирной линейки в вертикальной и горизонтальной плоскостях обеспечивают примерно равную расчетную точность правки 0,001 – 0,002 мм, а погрешность схемы с поворотом ведущего круга составила 0,005 – 0,02 мм, что указывает на нецелесообразность использования первой схемы на практике.

Решена задача определения периодичности расчета параметров наладки при правке, обусловленной изменением профиля ведущего круга. Рекомендован повторный расчет наладок при съеме 0,5 мм при правке круга для обработки бомбинированных поверхностей и 5 мм – для обработки цилиндрических поверхностей.

Решены задачи формообразования ведущих кругов для обработки конических и бомбинированных поверхностей. Предложено для формообразования нелинейчатой винтовой поверхности использовать коническую форму шлифовального круга, а задачу решать на основе оптимизации межосевого расстояния, угла перекрещивания и угла профиля круга.

Таким образом, разработанные методики профилирования и правки ведущих кругов, а также конструктивные решения обеспечили высокую точность обработки и расширение технологических возможностей бесцентровых шлифовальных станков с продольной подачей при изготовлении деталей подшипников.

В четвертой главе рассмотрено обеспечение точности бесцентрового суперфиниширования при проектировании и наладке станков на основе профилирования валковой системы и создания требуемой формообразующей траектории по детерминированным моделям.

Профилирование валков формообразующей подсистемы суперфинишного станка для обработки цилиндрических, конических и бомбинированных поверхностей выполнено аналогично профилированию ведущего круга шлифовального станка. Отличительные особенности заключаются в координатных схемах и используемых наладочных параметрах станков.

Для изготовления квазигиперболоидных валков станка предложены две схемы шлифования (пат. RU 2212994, 2278014): с разворотом шлифовального круга в вертикальном и горизонтальном направлениях, с разворотом в вертикальном направлении и смещением шлифовального круга относительно оси центров станка.

Получены уравнения поверхности валков по схеме с одновременным поворотом круга в вертикальной и горизонтальной плоскостях:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= -R_{кр} \sin \vartheta \cos \psi - z \sin \psi; \\ Y_1 &= R_{кр} \cos \vartheta \cos \nu - (z \cos \psi - R_{кр} \sin \vartheta \sin \psi) \sin \nu - T; \\ Z_1 &= R_{кр} \sin \vartheta \cos \nu + (z \cos \psi - R_{кр} \sin \vartheta \sin \psi) \cos \nu; \\ \operatorname{tg} \vartheta &= -\frac{z \operatorname{tg} \psi}{T \cos \nu + z \sin \nu}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $R_{кр}$ – радиус шлифовального круга; ϑ , z – криволинейные координаты поверхности круга; ψ , ν – проекции угла перекрещивания осей шлифовального круга и валка на вертикальную и горизонтальную плоскости; T – межосевое расстояние шлифовального круга и валка.

При использовании уравнений (6) отклонения профиля валков составили 0,001 – 0,005 мм при погрешности установки наладочных параметров: угловых – 10", линейных – 0,005 мм.

Решена задача формообразования валков с нелинейчатой винтовой поверхностью на резьбошлифовальных станках на основе численного профилирования фасонного шлифовального круга.

Впервые создана математическая модель для анализа формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании. Заготовка описана с учетом ее размеров и положения в декартовой системе координат станка $S_{\Sigma}(X_{\Sigma} O_{\Sigma} Y_{\Sigma} Z_{\Sigma})$, заданного шестью координатами (рис. 4).

Формообразующая подсистема представлена совокупностью следующих координатных систем: $S_{\Sigma}(X_{\Sigma} O_{\Sigma} Y_{\Sigma} Z_{\Sigma})$ – система, связанная со станиной станка; $S_3(X_3 O_3 Y_3 Z_3)$ – система заготовки; $S_B^I(X_B^I O_B^I Y_B^I Z_B^I)$ – система левого валка; $S_B^{II}(X_B^{II} O_B^{II} Y_B^{II} Z_B^{II})$ – система правого валка. Условием взаимного касания поверхностей заготовки и двух валков является равенство радиусов-векторов \bar{r} и касательных $\bar{\tau}$ в контактных точках. Нахождение формообразующей траектории без нарушения общности сведено к определению совокупности плоских сечений $Z_{\Sigma} = Z_i$ по длине обработки.

Формализация указанного условия привела к системе уравнений F_i :

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= u^I \sin \psi^I \cos \varphi^I + r \cos \vartheta^I \cos \beta - z_3^I \sin \beta - v - a = 0; \\ F_2 &= u^I \sin \psi^I \sin \varphi^I \cos \lambda + A \sin \lambda + r \sin \vartheta^I \cos \alpha + B \sin \alpha - b = 0; \\ F_3 &= u^I \sin \psi^I \sin \varphi^I \sin \lambda + A \cos \lambda - r \sin \vartheta^I \sin \alpha - B \cos \alpha - c = 0; \\ F_4 &= u^{II} \sin \psi^{II} \cos \varphi^{II} + r \cos \vartheta^{II} \cos \beta + z_3^{II} \sin \beta - v + a = 0; \\ F_5 &= u^{II} \sin \psi^{II} \sin \varphi^{II} \cos \lambda - C \sin \lambda + r \sin \vartheta^{II} \cos \alpha + D \sin \alpha - b = 0; \\ F_6 &= u^{II} \sin \psi^{II} \sin \varphi^{II} \sin \lambda - C \cos \lambda + r \sin \vartheta^{II} \sin \alpha + D \cos \alpha + c = 0; \\ F_7 &= \sin \vartheta^I \cos \beta - \cos \psi^I \sin \varphi^I = 0; \\ F_8 &= \cos \vartheta^I \cos \alpha + \sin \psi^I \sin \alpha \sin \beta - \cos \psi^I \cos \varphi^I \cos \lambda + \sin \psi^I \sin \lambda = 0; \\ F_9 &= \cos \vartheta^I \sin \alpha - \sin \psi^I \cos \alpha \sin \beta + \cos \psi^I \cos \varphi^I \sin \lambda + \sin \psi^I \cos \lambda = 0; \\ F_{10} &= \sin \vartheta^{II} \cos \beta - \cos \psi^{II} \sin \varphi^{II} = 0; \\ F_{11} &= \cos \vartheta^{II} \cos \alpha - \sin \psi^{II} \sin \alpha \sin \beta - \cos \psi^{II} \cos \varphi^{II} \cos \lambda - \sin \psi^{II} \sin \lambda = 0; \\ F_{12} &= \cos \vartheta^{II} \sin \alpha + \sin \psi^{II} \cos \alpha \sin \beta - \cos \psi^{II} \cos \varphi^{II} \sin \lambda + \sin \psi^{II} \cos \lambda = 0; \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где r – радиус заготовки; $\vartheta^I, \vartheta^{II}, z_3^I, z_3^{II}$ – криволинейные координаты поверхности заготовки; R^I, R^{II} – радиусы валков; $\varphi^I, \varphi^{II}, u^I, u^{II}$ – криволинейные координаты валков; ψ^I, ψ^{II} – углы образующих конусов валков; 2λ – угол перекрещивания осей валков; $2v$ – межосевое расстояние валков; z_B^I, z_B^{II} – координаты, задающие положение валков относительно точки O_{Σ} ;

$$\begin{aligned} A &= R^I \operatorname{ctg} \psi^I - u^I \cos \psi^I + z_B^I; \quad B = r \cos \vartheta^I \sin \beta + z_3^I \cos \beta; \\ C &= R^{II} \operatorname{ctg} \psi^{II} - u^{II} \cos \psi^{II} + z_B^{II}; \quad D = -r \cos \vartheta^{II} \sin \beta + z_3^{II} \cos \beta. \end{aligned}$$

Для решения системы трансцендентных уравнений (7) использован метод многопараметрической оптимизации по целевой функции:

$$\Phi(\vartheta_3^I, \vartheta_3^{II}, z_3^I, z_3^{II}, \varphi^I, \varphi^{II}, u^I, u^{II}, \alpha, \beta, a, b, c) = \sum_{i=1}^{12} F_i^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где функция Φ – мультимодальная.

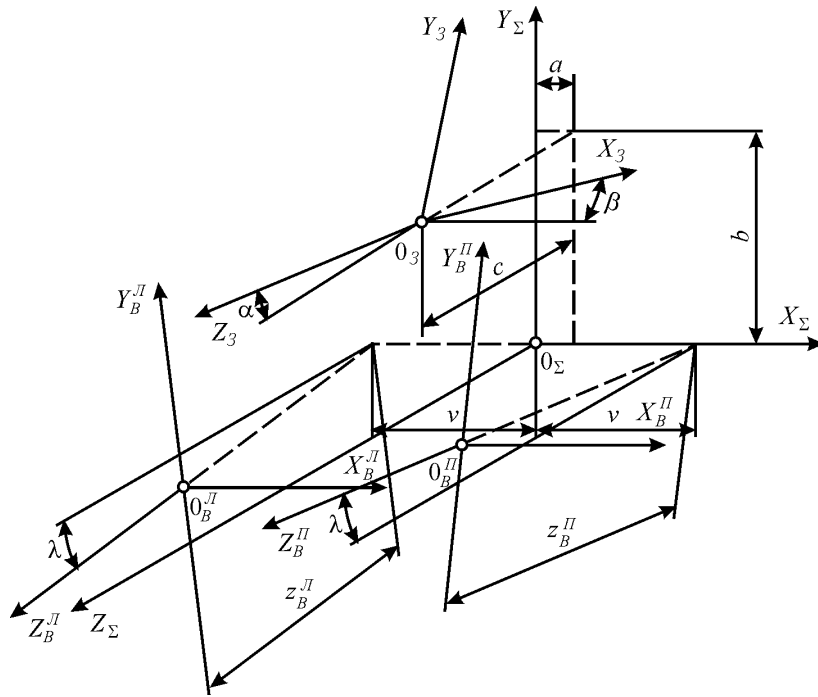


Рис. 4. Координатная схема формообразующей подсистемы суперфинишного станка

Для поиска глобального экстремума применен метод мултистарта. Численное моделирование траектории для различных форм валков и экспериментальная проверка подтвердили высокую степень адекватности разработанной математической модели.

На основе системы уравнений (7) разработана методика оптимальной наладки параметров λ и ν суперфинишного станка с использованием целевой функции G , формируемой по максиминному критерию. С учетом критериальных, функциональных и параметрических ограничений безусловная целевая функция $G(\Phi, \lambda, \nu)$, определяемая по алгоритму, преобразуется в условную функцию $Q(X)$ по методу штрафных функций:

$$Q(X) = G(X) + U(X), \quad (9)$$

где $U(X) = r_i \sum_i (1/\psi_i(\lambda, \nu))$ – функция штрафа; X – вектор управляемых параметров наладки;

$\psi_i(\lambda, \nu) \geq 0$ – ограничения типа неравенств; r_i – коэффициенты, подбираемые из требований точности и экономичности вычисления.

При реализации оптимальной наладки станка выявлено, что отклонения формообразующей траектории в вертикальной плоскости в большинстве случаев удается минимизировать до требуемой величины, а отклонения в горизонтальной плоскости в меньшей степени поддаются управлению. С целью компенсации последних разработан способ наладки, при котором валковое устройство разворачивают относительно каретки суперфинишного станка (пат. RU 2239539). Исследованиями установлена рекомендуемая точность геометрической наладки бесцентрового суперфинишного станка: по углу перекрещивания – $10''$, по межосевому расстоянию – $0,1$ мм.

Результаты точности роликов 6-1HP16092-E.62 и 6-1HP16115E.62 после обработки на бесцентровых шлифовальных станках модели SASL-200×500 и суперфинишных станках модели SZZ-3 представлены на рис. 5.

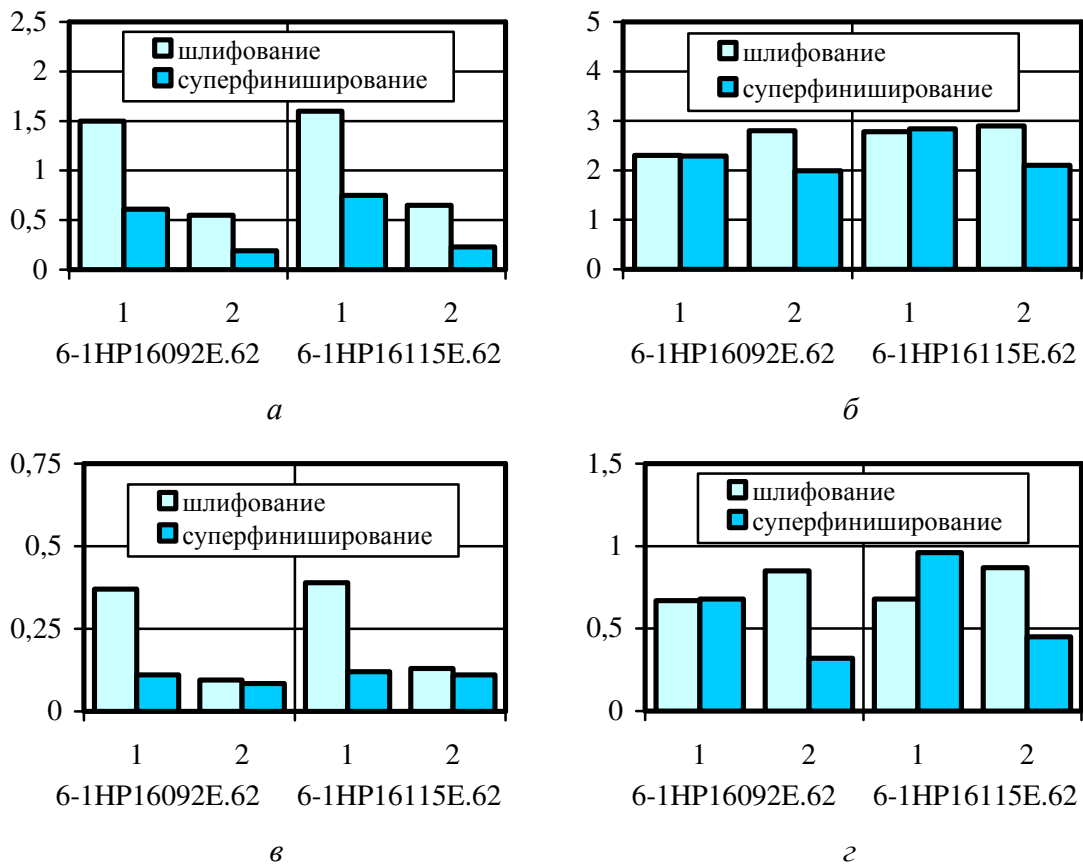


Рис. 5. Отклонение от круглости и профиля продольного сечения роликов 6-1HP16092E.62, 6-1HP16115E.62: 1 – стандартная наладка; 2 – оптимальная наладка

На рис. 5 показаны: *a* – среднеарифметическое значение отклонения от круглости; *б* – среднеарифметическое значение отклонения профиля продольного сечения; *в* – СКО отклонения от круглости; *г* – СКО отклонения профиля продольного сечения (в мкм).

Анализ результатов моделирования показал, что на суперфинишном станке с валками типа однополостных гиперблоидов траектория движения цилиндрических заготовок хорошо аппроксимируется дугой окружности, что позволяет использовать их при обработке бомбинированных поверхностей и в ряде случаев отказаться от трудоемкого изготовления строго спрофилированных валков. В связи с этим рассчитан диапазон применимости такого метода в зависимости от диаметров заготовок от 5 до 50 мм и радиусов бомбины от 1000 до 10000 мм.

В ходе экспериментальных исследований подтверждена склонность методов бесцентровой абразивной обработки к геометрическому наследованию погрешностей формы. При бесцентровом суперфинишировании коэффициент корреляции составил 0,878 для отклонения от круглости и 0,857 для отклонения профиля продольного сечения.

Применение разработанных методик профилирования валков, способов их изготовления и наладки станков способствовало повышению точности обработки, эффективности наладки и упрощению технологии изготовления валков бесцентровых суперфинишных станков при обработке конических и бомбинированных поверхностей роликов подшипников.

В пятой главе исследованы кинематические и силовые параметры бесцентрового шлифования и суперфиниширования и установлены их взаимосвязи с наладочными параметрами станков, на основании чего сформированы ограничения на последние.

В процессе бесцентрового шлифования заготовка и ведущий круг касаются друг друга по пространственной линии контакта, поэтому при вращении ведущего круга с постоянной угловой скоростью ω результирующая скорость и ее проекции различны по длине обработки.

Получены следующие выражения для окружной скорости заготовки

$$V_o = R_i \omega \sqrt{\cos^2 \vartheta_i \cos^2 \beta + (\cos \vartheta_i \cos \alpha - \sin \vartheta_i \sin \alpha \sin \beta)^2} \quad (10)$$

и ее продольной скорости

$$V_{II} = R_i \omega (\cos \vartheta_i \sin \alpha + \sin \vartheta_i \cos \alpha \sin \beta), \quad (11)$$

где R_i, ϑ_i – радиусы и углы точек контакта ведущего круга с заготовкой вдоль траектории движения.

Выявлено, что при бесцентровом шлифовании и суперфинишировании с продольной подачей изменение кинематических параметров имеет идентичный характер. Наблюдаются три варианта изменения окружной и продольной скоростей заготовки по длине обработки: скорости монотонно увеличиваются или уменьшаются от входа к выходу из зоны обработки; скорости имеют минимум. Анализ показал, что наибольшее влияние оказывает профиль ведущего круга (валков). Рациональным вариантом будет тот, при котором скорости монотонно уменьшаются от входа к выходу, тем самым создавая «подпор» заготовок.

При бесцентровом шлифовании изменения окружной и продольной скоростей заготовок малы, и их можно считать постоянными. При бесцентровом суперфинишировании изменение скоростей достигает 5 – 10 %. Для снижения разности скоростей на краях зоны обработки рекомендовано уменьшить угол перекрещивания осей валков и увеличить диаметр валков.

Бесцентровое шлифование с продольной подачей характеризуется односторонними связями между заготовкой и базирующими элементами станка. Стабильность вращения заготовки определяется условиями трения в местах контакта с ведущим кругом и опорным ножом, которые зависят от сил шлифования.

Силы, действующие в поперечном сечении заготовки при бесцентровом шлифовании (рис. 6 а), подчиняются уравнениям равновесия:

$$\left. \begin{aligned} \sum X &= P_Y \cos \alpha_3 + P_Z \sin \alpha_3 + N_1 \sin \alpha_1 - R_1 \cos \alpha_1 - N_2 \cos \alpha_2 - R_2 \sin \alpha_2 = 0; \\ \sum Y &= P_Y \sin \alpha_3 - P_Z \cos \alpha_3 + N_1 \cos \alpha_1 + R_1 \sin \alpha_1 + N_2 \sin \alpha_2 - R_2 \cos \alpha_2 = 0; \\ \sum M_0 &= (P_Z - R_1 - R_2)r_0 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где r_0 – радиус заготовки; α_1 – угол скоса опорного ножа; α_2, α_3 – наладочные углы ведущего и шлифовального кругов; P_Y, P_Z – радиальная и касательная составляющие силы резания; N_1, R_1, N_2, R_2 – нормальная и касательная составляющие сил реакции в местах контакта заготовки с опорным ножом и ведущим кругом соответственно.

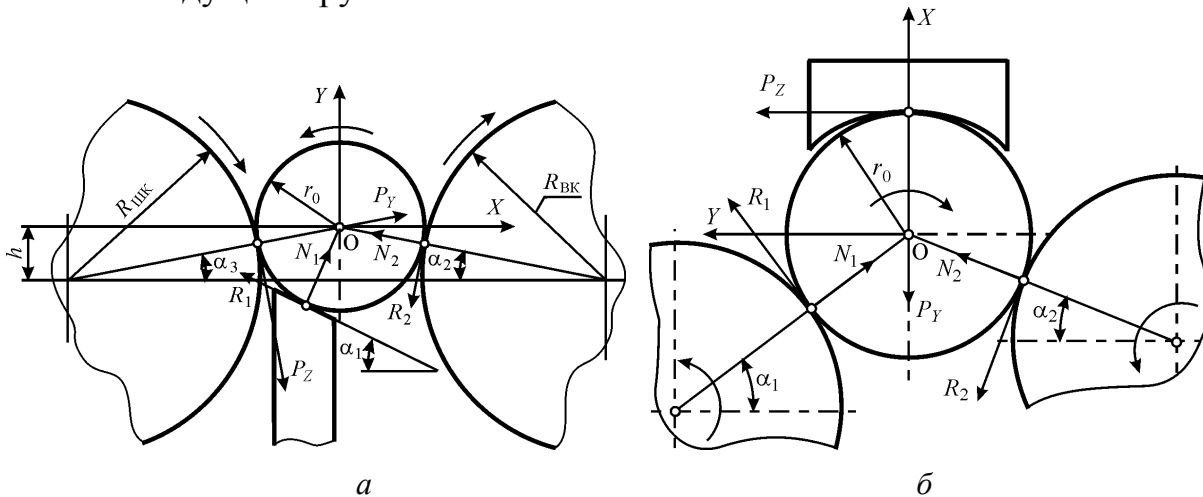


Рис. 6. Схема действия сил при шлифовании (а) и суперфинишировании (б)

Из уравнений равновесия сил (12) получено инвариантное (не зависящее от силы резания) граничное условие стабильного вращения заготовки, при котором не происходит ее «раскручивания» шлифовальным кругом:

$$\begin{aligned} & \sin(\alpha_1 - \alpha_2)(f_2 - f_1) - \cos(\alpha_1 - \alpha_2)(1 + f_1 f_2) + f_1(b \cos \alpha_1 + c \sin \alpha_1) + \\ & f_2(a \cos \alpha_2 - d \sin \alpha_2) - a \sin \alpha_2 - b \sin \alpha_1 + c \cos \alpha_1 - d \cos \alpha_2 - ab + cd = 0, \end{aligned} \quad (13)$$

где k – коэффициент резания; f_1, f_2 – коэффициенты трения заготовки с опорным ножом и ведущим кругом соответственно; $a = f_1(k \cos \alpha_3 + \sin \alpha_3)$; $b = f_2(k \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3)$; $c = f_2(k \cos \alpha_3 + \sin \alpha_3)$; $d = f_1(k \sin \alpha_3 - \cos \alpha_3)$.

Условие «останова» заготовки имеет вид:

$$[kn - f_1 l][n(\sin \alpha_2 - f_2 \cos \alpha_2) + m(\cos \alpha_2 + f_2 \sin \alpha_2)] + f_2 n[ml - n(\sin \alpha_3 - k \cos \alpha_3)] < 0.$$

где $l = \cos \alpha_3 + k \sin \alpha_3$.

Обеспечение стабильного вращения заготовки необходимо не только в рабочей зоне станка, но и на входе и выходе заготовок. Этого можно достичь за счет выбора наладочных параметров станка, материала опорного ножа и ведущего круга.

Граничное условие стабильного вращения заготовки без шлифовального круга имеет вид:

$$\alpha_1 = 2 \arctg \left(1 + \sqrt{1 - f_1^2 (1 - \sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 / f_2)^2} / 1 + \sin \alpha_2 - \cos \alpha_2 / f_2 \right). \quad (14)$$

В качестве примера на рис. 7 представлен график граничного условия в координатах углов α_1 и α_2 от коэффициента трения f_2 на ведущем

круге при $f_1 = 0,15$ и $k = 0,4$, соответствующих предварительному шлифованию колец подшипников.

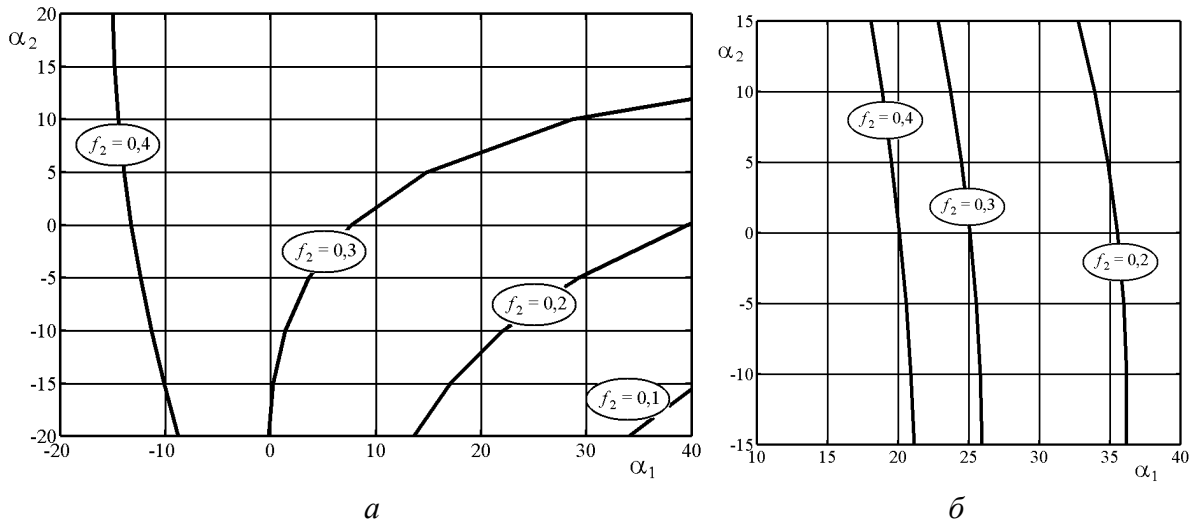


Рис. 7. Граничное условие силового замыкания контакта: a – со шлифовальным кругом; b – без шлифовального круга

Исследование условий (13) и (14) показало, что увеличение коэффициента трения ведущего круга увеличивает область допустимых значений наладочных углов кругов и угла скоса опорного ножа. При увеличении коэффициента резания («острый» шлифовальный круг) происходит смещение зоны допустимых углов наладки в четвертый октант. В частности, при отсутствии шлифовального круга требуется больший угол скоса ножа, чем при шлифовании, а также коэффициент трения на ведущем круге, превышающий не менее чем в два раза коэффициент трения на опорном ноже.

При бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах заготовка прижимается к опорам силой Q , возникающей за счет эксцентриситета между осями заготовки O и планшайбы A . Стабильные условия формообразования обеспечиваются при выполнении двух условий:

- равенства нулю суммарного момента от сил трения на опорах и силы резания

$$[f \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)][f(G + Q \cos \lambda) + kP_Y(f - a)] - [\sin(\alpha + \beta) + f \cos(\alpha + \beta)] \times \\ \times [fQ \sin \lambda + P_Y(f - kb)] + af(P_Y + Q \sin \lambda) - bf(kP_Y + G + Q \cos \lambda) = 0,$$

где β – угол установки опор относительно шлифовального круга; λ – угол приложения силы Q ; $a = \sin \beta + f \cos \beta$; $b = f \sin \beta - \cos \beta$;

- равенства сил реакций на опорах

$$(kP_Y + G + Q \cos \lambda)(f \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta) + f \sin \beta - \cos \beta) - \\ - (P_Y + Q \sin \lambda)(\sin(\alpha + \beta) + f \cos(\alpha + \beta) + \sin \beta + f \cos \beta) = 0.$$

Установлено, что силу Q следует назначать минимально достаточной для стабильного прижима заготовки к опорам, угол ее приложения λ может изменяться в пределах $\pm 45^\circ$. Стабильное формообразование обеспечивают выбором угла β ; изменению угла α между опорами от 60 до 120° соответствует изменение угла β от 90 до 45° .

Граничное условие силового замыкания контакта при бесцентровом суперфинишировании (рис. 6 б), связывающее углы α_1 и α_2 контакта заготовки с валками и параметры f , k , имеет вид:

$$\sin(\alpha_1 + \alpha_2)(1 + f^2) + (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)(f^2 - \frac{f}{k}) - (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2)(\frac{f^2}{k} + f) = 0. \quad (15)$$

Анализ граничного условия (15) показал, что увеличение коэффициента трения и уменьшение коэффициента резания расширяют область допустимых углов контакта заготовки с валками. Ведущим на всей длине обработки с продольной подачей будет только один валок. На основании этого предложены новые конструктивные решения валковой системы станка (пат. RU № 78112, № 2253559).

Таким образом, на основе полученных граничных условий силового замыкания контакта определены области допустимых параметров наладки бесцентровых шлифовальных и суперфинишных станков, обеспечивающие стабильное вращение заготовок и наилучшее изменение скоростей.

Шестая глава посвящена оптимальной наладке станков на основе моделей базирования заготовок с учетом отклонений формы и стохастического характера погрешностей в партии.

Поперечное сечение заготовки в полярной системе координат:

$$r = r_0 + \sum_{n=2}^p a_n \cos(n\varphi - \varphi_n), \quad (16)$$

где r_0 – радиус средней окружности профиля заготовки; n – круговая частота (текущий номер гармоники); a_n – амплитуда n -й гармоники; φ – полярный угол; φ_n – начальная фаза n -й гармоники; p – максимальное число гармоник.

Согласно авторскому подходу, для описания базирования с учетом переменности процесса введены две системы координат. Основная неподвижная декартова система координат ($X O Y$) имеет начало в центре профиля заготовки, находящейся в номинальном положении, дополнительная подвижная полярная система координат связана с центром O_1 профиля в процессе вращения и перемещения. Погрешность базирования Δ представляет собой изменение положения дополнительной системы в основной системе координат.

Для оценки погрешности базирования обоснован критерий в виде среднего арифметического значений радиусов центра профиля заготовки при ее вращении в основной системе координат:

$$K = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \Delta(\varphi_j), \quad (17)$$

где φ_j – угол поворота заготовки при вращении; k – число расчетных точек траектории.

При бесцентровом базировании наружной поверхности на неподвижных опорах (рис. 8) положение центра O_1 заготовки находится путем

векторного сложения смещений Δ_1 и Δ_2 вдоль плоских опор. Если принять, что заготовка одновременно и постоянно находится в точечном контакте с обеими опорами, то при базировании она последовательно перемещается по опорам на величины Δ_1 и Δ_2 , представляющие собой проекции Δ'_1 и Δ'_2 на направления углов α_2 и α_1 противоположных опор:

$$\begin{cases} \Delta_1 = \Delta'_1 [\sin(\beta_1 + \alpha_2) + \cos(\beta_1 + \alpha_2) \operatorname{ctg}(\alpha_1 + \alpha_2)]; \\ \Delta_2 = \Delta'_2 [\sin(\beta_2 + \alpha_1) + \cos(\beta_2 + \alpha_1) \operatorname{ctg}(\alpha_1 + \alpha_2)]; \end{cases} \quad (18)$$

где зазор между опорой и заготовкой в исходном положении

$$\Delta' = \{r - r_1\} \rightarrow \max, \quad (19)$$

где r_1 – модуль радиуса-вектора опоры; α_1, α_2 – углы опор.

Рассмотренная модель реализована в виде программы на языке C++, которая позволяет многократно последовательно рассчитывать погрешность базирования, имитируя процесс обработки изменением гармонического состава профиля заготовки.

Путем исследования траекторий движения центра заготовки при бесцентровом базировании для отдельных гармоник профиля (рис. 9) установлено, что при малых углах α ($\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$) они имеют вытянутую по оси Y форму, а при больших углах – вытянутую по оси X (при нулевой начальной фазе гармоники). В большинстве случаев преобладают траектории овальной и трехгранной форм, что и обуславливает появление таких погрешностей на заготовке.

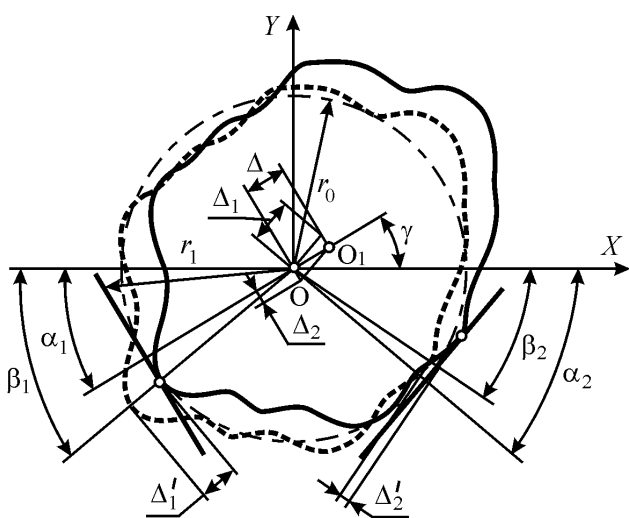


Рис. 8. Схема базирования при шлифовании с поперечной подачей

Рис. 9. Траектория движения центра заготовки: a – 2-я гармоника; b – 3-я гармоника; $в$ – 4-я гармоника; 1 – $\alpha = 150^\circ$; 2 – $\alpha = 40^\circ$; 3 – оптимальный α

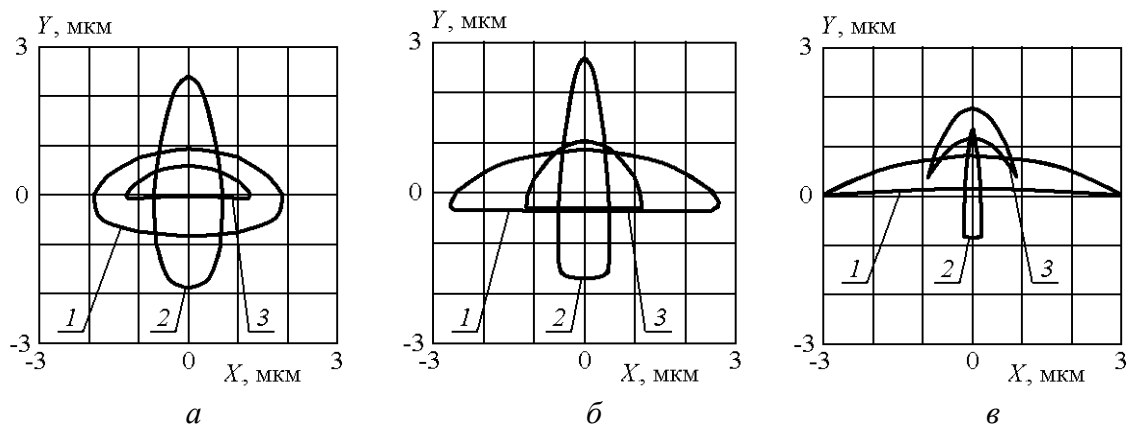


Рис. 9. Траектория движения центра заготовки: a – 2-я гармоника; b – 3-я гармоника; $в$ – 4-я гармоника; 1 – $\alpha = 150^\circ$; 2 – $\alpha = 40^\circ$; 3 – оптимальный α

Анализ точности базирования по предложенному критерию K показал, что процесс базирования подчиняется управлению за счет изменения углов контакта заготовки с базирующими элементами станка. Для 2-, 3-, 4-, 5-й гармоник оптимальные углы наладки α находятся в диапазоне от 80 до 110°. При изменении углов контакта в интервале 40 – 150° значение критерия K изменяется от 0,7 до 1,8. Таким образом, оптимальная наладка позволяет уменьшить погрешность базирования по сравнению с погрешностью базового профиля заготовки на 30 %, в то время как традиционная наладка приводит к ее возрастанию до 1,5 – 2 раз.

При бесцентровом суперфинишировании заготовка базируется на двух валках, поперечные сечения которых представляют собой окружности радиусов R_1 и R_2 с центрами в точках A_1 и A_2 .

Центр заготовки при базировании последовательно движется по дугам окружностей радиусов A_1O_1 и A_2O_1 . Точка O_1 пересечения этих траекторий имеет координаты, определяемые из системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -(R_1 + r_0) \cos \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \cos \varphi_1 &= (R_2 + r_0) \cos \alpha_2 - (R_2 + r_0 + \Delta_2) \cos \varphi_2; \\ -(R_1 + r_0) \sin \alpha_1 + (R_1 + r_0 + \Delta_1) \sin \varphi_1 &= -(R_2 + r_0) \sin \alpha_2 + (R_2 + r_0 + \Delta_2) \sin \varphi_2, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

где проекции Δ_1, Δ_2 смещений Δ'_1, Δ'_2 на направление углов α_2 и α_1 :

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta_1 &= R_1 - \sqrt{r_1^2 + (R_1 + r_0)^2 - 2r_1(R_1 + r_1) \cos(\beta_1 - \alpha_1)}; \\ \Delta_2 &= R_2 - \sqrt{r_2^2 + (R_2 + r_0)^2 - 2r_2(R_2 + r_2) \cos(\beta_2 - \alpha_2)}. \end{aligned} \right. \quad (21)$$

В производственных условиях наладку бесцентровых шлифовальных и суперфинишных станков целесообразно выполнять для партии заготовок по стохастическим характеристикам. При решении этой задачи обосновано использование метода статистического моделирования Монте-Карло, основная идея которого состоит в моделировании стохастических входных данных, многократной реализации аналитической модели базирования и получении вероятностных характеристик, численные значения которых совпадают с результатом решения детерминированной задачи. Статистическая обработка полученных серий погрешности базирования дает сведения о влиянии параметров наладки станка на точность обработки партии заготовок. Моделирующий алгоритм приведен на рис. 10.

Для генерирования случайных чисел с заданными законами распределения применен метод инверсии, состоящий в формировании последовательности равномерно распределенных нормированных случайных чисел (с учетом их корреляции) и последующем преобразовании в заданный закон распределения.

С целью формирования базы исходных данных для статистического моделирования проведена идентификация распределений геометрических параметров заготовок. Объектами исследования служили партии роликов и колец подшипников, обработанные на бесцентровых шлифовальных стан-

ках моделей *SASL-200×500*, *SASL-5AD*, *SWaAGL-50* и суперфинишных станках моделей *SZZ-3*, *SZASLE-50×500*.

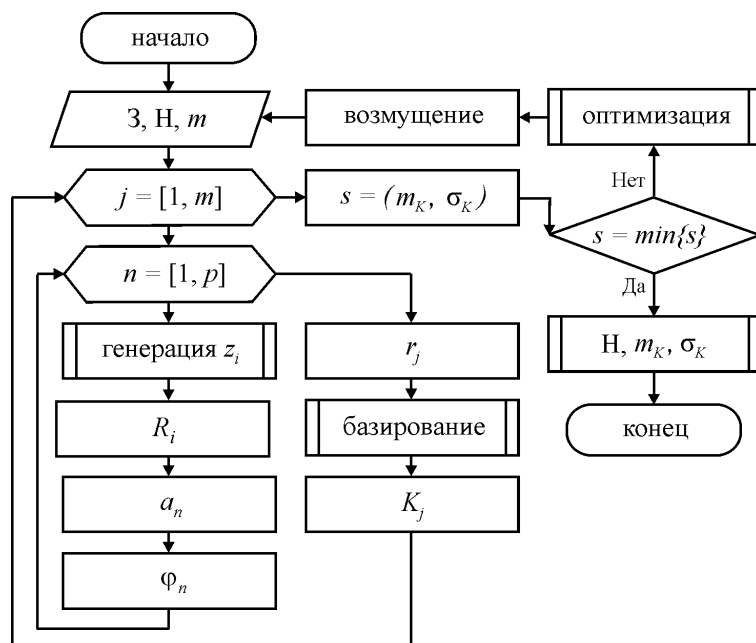


Рис. 10. Моделирующий алгоритм для наладки станка при обработке партии заготовок

Установлено, что при бесцентровой абразивной обработке комплексные показатели точности формы – отклонение от круглости и профиля продольного сечения – распределены по нормальному или логарифмически нормальному законам. Начальные фазы гармоник удовлетворяют равномерному распределению. Амплитуды гармоник наилучшим образом удовлетворяют распределению Пирсона первого типа. Корреляционный анализ амплитуд гармоник поперечного профиля заготовок показал, что при бесцентровом шлифовании имеется значимая корреляция между несколькими гармониками, а при шлифовании с поперечной подачей – и между группами гармоник.

Статистическое моделирование на основе экспериментальных данных установило, что критерий K описывается нормальным законом при шлифовании с продольной подачей и суперфинишировании и логарифмически нормальным законом – при шлифовании с поперечной подачей. Поэтому в качестве оптимизируемых параметров при наладке станков приняты математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) критерия K . На рис. 11 показаны графики плотности вероятности f критерия K для трех вариантов наладки шлифовальных станков.

Анализ результатов статистического моделирования показал, что при шлифовании с продольной подачей оптимальный вариант наладки уменьшает МО и СКО на 26 %, при шлифовании с поперечной подачей МО – на 21 % и СКО – на 15 %, при суперфинишировании МО и СКО – на 50 %.

Практическая реализация оптимальной наладки станков моделей *SWaAGL-*

50 и SZZ-3 по предложенным статистическим параметрам с учетом силовых и конструктивных ограничений обеспечила повышение точности формы деталей на 10 – 15 % при шлифовании и 15 – 25 % при суперфинишировании.

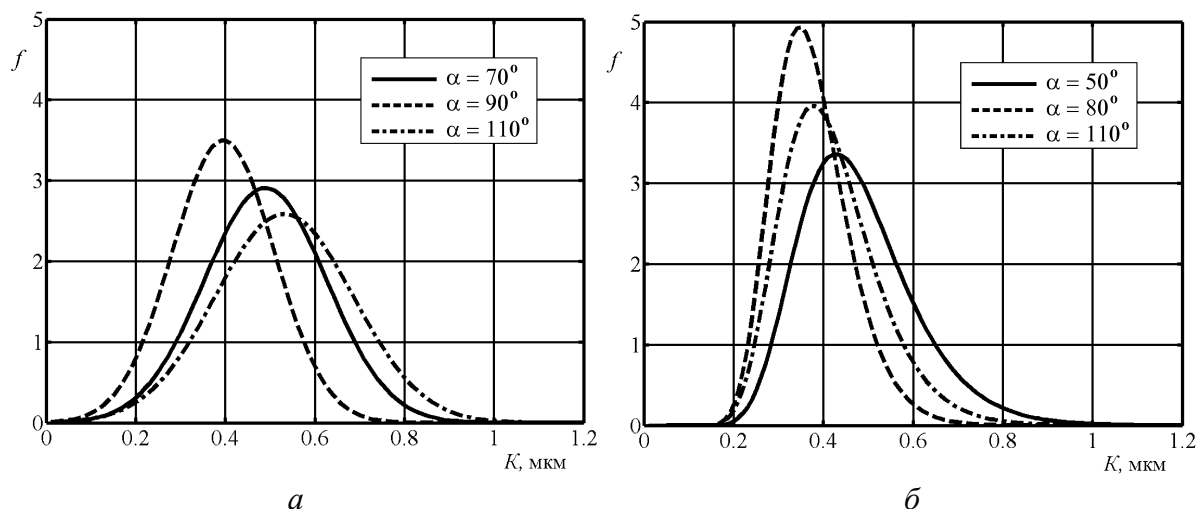


Рис. 11. Плотность вероятности критерия K при бесцентровом шлифовании от наладки станка: a – с продольной подачей; b – с поперечной подачей

На рис. 12 приведены усредненные данные мониторинга отклонения от круглости желоба кольца подшипника 5-830900AE1.02 на операции окончательного шлифовании в течение 2006 г., где показаны: K_x – коэффициент исправления по среднеарифметическому значению; K_σ – коэффициент исправления по среднеквадратическому отклонению. Из графика видно, что оптимальная наладка обеспечила одновременное увеличение параметров K_x и K_σ от 0,6 – 1,4 до 1,1 – 2,75.

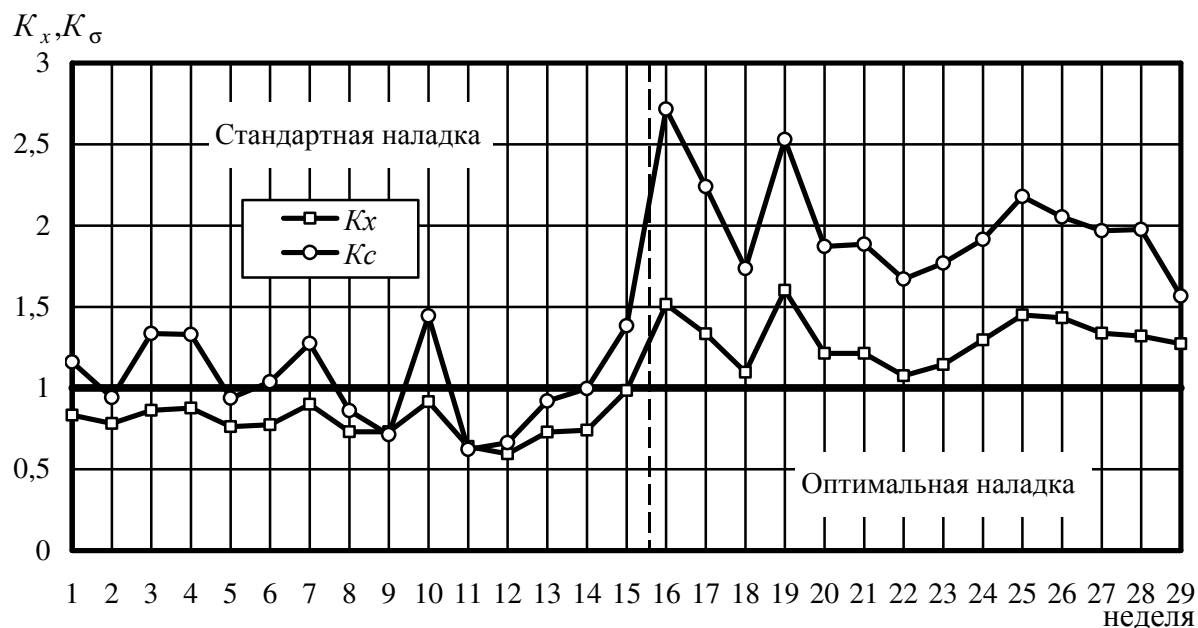


Рис. 12. Статистические коэффициенты исправления по отклонению от круглости

Оптимальная наладка бесцентрового шлифовального станка модели *SWaAGL-50* при обработке колец подшипника 5-830900AE1.02 позволила снизить отклонение от круглости по среднеарифметическому значению на 11 % и СКО на 12 %, что уменьшило вероятность брака с 5,1 до 0,6 %. Волнистость и шероховатость поверхностей деталей при этом соответствовали техническим требованиям.

Таким образом, обоснована методика оптимальной наладки станков по критериям приведенной погрешности базирования и статистическим коэффициентам исправления формы заготовок с применением моделирования Монте-Карло, практическая реализация которой обеспечила стабильное уменьшение отклонения от круглости в партиях деталей на 10 – 25 %.

В седьмой главе обоснованы методы обработки данных при измерении деталей типа тел вращения и развиты на основе гармонического анализа с учетом погрешности центрирования.

Прецизионные кругломеры (например, приборы Talyrond фирмы Taylor Hobson) широко используются в лабораторных условиях при контроле формы деталей подшипников. На основе анализа схемы измерения на кругломере (рис. 13) получено выражение, описывающее среднюю окружность профиля (r_1, φ_1) в системе координат ($X_1 O_1 Y_1$) при равномерном угловом расположении точек:

$$r_1 = \sqrt{R^2 + e^2 + 2Re \cos \left\{ \varphi_1 - \psi + \arcsin \left[\frac{e}{R} \sin(\varphi_1 - \psi) \right] \right\}}, \quad (22)$$

где R – радиус средней окружности; e, ψ – амплитуда и начальная фаза эксцентриситета; φ_1 – полярный угол в системе кругломера.

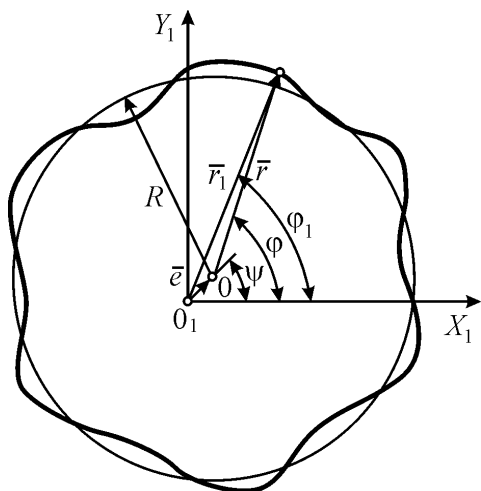


Рис. 13. Схема измерения поперечного профиля детали

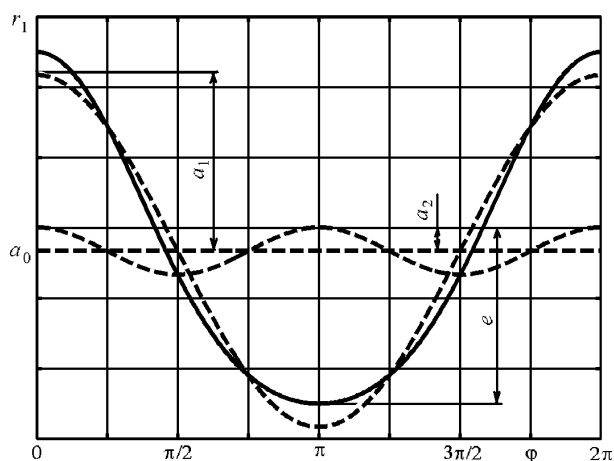


Рис. 14. Гармонический анализ средней окружности профиля детали

Гармонический анализ выражения (22), выполненный численным методом, показал, что эксцентрическая средняя окружность описывается суперпозицией нулевой, первой и четных гармоник с амплитудами, быстро убывающими при увеличении номера гармоники. Первая гармоника одно-

значно определяет амплитуду и начальную фазу эксцентриситета, хотя при этом развертка эксцентрической окружности отличается от косинусоиды. На рис. 14 изображены средняя окружность 1 с эксцентриситетом e и характеризующие ее первая 2, вторая 3 и третья 4 гармоники.

Обоснован способ обработки результатов измерения отклонения от круглости, позволяющий минимизировать методическую погрешность центрирования, с помощью коррекции измеренных длин радиусов-векторов r_1 точек профиля на величину Δr :

$$r = r_1 - \Delta r = r_1 - a_1 \cos(\varphi - \psi_1) + a_2 [1 - \cos(2\varphi - \psi_1)]. \quad (23)$$

В выражении (23) амплитуду a и начальную фазу ψ для первой гармоники определяют на основании гармонического анализа профиля детали по формулам Бесселя, а для второй гармоники – на основании гармонического анализа эксцентрической средней окружности по выражению (22).

Сравнительный анализ точности измерения отклонения от круглости с использованием статистического моделирования установил, что стандартная методика дает неудовлетворительный результат при погрешности центрирования 0,05 мм, а предложенная методика при погрешности центрирования 0,2 мм обеспечивает точность измерения 0,01 мкм. Разработанная методика прошла апробацию и получила применение в способе измерения на кругломерах (пат. RU 2243499).

Предложенный подход также нашел применение при координатном и разностном способах измерения отклонения от круглости и диаметров деталей (пат. RU 2239785, 2240496, 2267088).

Создана математическая модель бесцентрового измерения на призме с датчиком малых линейных перемещений, базирующаяся на численных методах решения, позволяющая анализировать погрешность измерения отклонения от круглости и определять оптимальные параметры наладки прибора. Разработанная модель по сравнению с ранее известными обладает более высокой степенью адекватности, что подтверждено тестовыми примерами, а также позволяет анализировать реальный профиль, заданный суперпозицией гармоник. Программная реализация (рис. 15) дает возможность визуализировать процесс измерения и интерактивно изменять параметры при поиске их оптимального значения.

Исследования показали, что при использовании одной призмы с постоянным углом раскрытия и одного датчика методическая погрешность при контроле отклонения от круглости достигает 80 %. Обоснована методика наладки призмы по углу раскрытия и угловому положению датчика для партии деталей с учетом стохастического характера отклонений формы на основе статистического моделирования. По экспериментальным данным для партии колец подшипников, изготавливаемых на ОАО «СПЗ», проведен расчет оптимальных параметров настройки прибора, в результате чего относительная погрешность измерения составила 30,8 %. Это позволяет эффективно использовать данную методику в цеховых условиях при массовом контроле партий деталей.

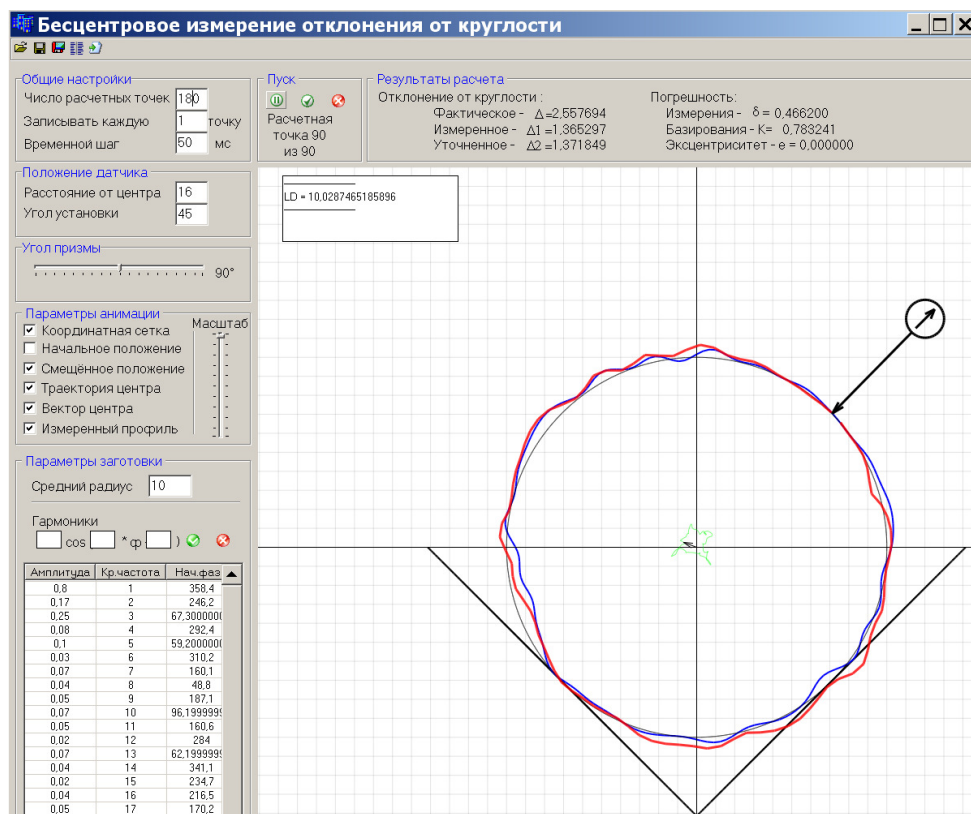


Рис. 15. Моделирование бесцентрового измерения отклонения от круглости

В результате исследований развиты методы обработки данных измерения на прецизионных кругломерах и на призме с датчиком малых линейных перемещений при помощи гармонического анализа, что позволило в первом случае повысить производительность в 2 – 3 раза, а во втором – уменьшить методическую погрешность в 1,5 – 2 раза.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Решена актуальная научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение и заключающаяся в обосновании и реализации методологии обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения на операциях бесцентровой абразивной обработки на основе оптимизации геометро-кинематических параметров формообразования по детерминированным и стохастическим моделям.

Основные результаты диссертационной работы.

1. Выявлены закономерности образования погрешностей формы заготовок при бесцентровой абразивной обработке в результате нарушения траекторий относительного движения инструмента и заготовки, возникающих вследствие неточностей формообразующей подсистемы станка, переменных условий базирования и технологической наследственности с учетом стохастических отклонений формы заготовок в партии.

2. Обоснована и реализована методология обеспечения качества профилирования рабочих поверхностей деталей подшипников качения, которая в отличие от существующих комплексно учитывает влияние детерминированных и стохастических составляющих геометрических, кинематических и силовых параметров формообразования. Данная методология позволяет определить оптимальные параметры формообразующей подсистемы на этапе проектирования и в процессе эксплуатации шлифовальных и суперфинишных станков.

3. Создана система критериальных оценок точности обработки через параметры наладки оборудования, включающая: результирующий вектор отклонений формообразующей траектории, приведенную погрешность базирования, статистические коэффициенты исправления формы заготовок. Основным критерий при формировании целевой функции в процессе параметрической оптимизации выбирается по максиминному принципу, а остальные критерии становятся ограничениями задачи.

4. Разработаны геометрические, кинематические и силовые модели формообразования на шлифовальных и суперфинишных станках, работающих на проход и врезанием, для обработки цилиндрических, конических и бомбинированных поверхностей, а также методики правки абразивных ведущих кругов шлифовальных станков и формообразования валков суперфинишных станков с погрешностью 0,001 – 0,005 мм.

5. Впервые разработана математическая модель расчета формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании. Численными и экспериментальными исследованиями доказана возможность получения бомбинированной поверхности роликов подшипников на валках типа однополостных гиперболоидов. Определены диапазоны применимости метода подналадок при суперфинишировании цилиндрических и бомбинированных заготовок диаметром 5 – 50 мм с радиусом бомбины 1000 – 10000 мм на постоянных комплектах валков.

6. Обосновано применение метода статистического моделирования Монте-Карло при наладке станков для обработки партии заготовок со стохастическим характером отклонений формы. На основе созданных математических моделей базирования с учетом погрешностей формы и статистического критерия реализована оптимальная наладка оборудования, обеспечившая снижение отклонения от круглости заготовок по среднеарифметическому значению и среднеквадратическому отклонению в партии на 10 – 25 %.

7. С целью обеспечения стабильности в процессе обработки исследованы кинематические и силовые параметры при бесцентровом шлифовании и суперфинишировании. Установлены закономерности изменения окружной и продольной скоростей заготовок по длине обработки. Определены инвариантные граничные условия силового замыкания контакта при суперфинишировании, «раскручивания» и «останова» заготовки шлифовальным кругом и стабильного вращения ведущим кругом при шлифова-

нии с продольной подачей, стабильного и равномерного прижима заготовки к неподвижным опорам при шлифовании с поперечной подачей. Проведенные исследования позволили определить диапазоны допустимых углов контакта заготовки с базирующими элементами станков.

8. Развита методика обработки данных при измерении отклонения от круглости для радиусного, координатного и разностного способов контроля. Разработана методика минимизации методической погрешности при измерении на прецизионных кругломерах, применение которой снизило требования к точности центрирования до 5 раз. На основе совершенствования математической модели выявлены особенности бесцентрового измерения отклонения от круглости и даны рекомендации по наладке угла раскрытия призмы и угла установки датчика, уменьшающие методическую погрешность измерения до 2 раз.

9. Результаты экспериментальных исследований, проведенные в лабораторных и производственных условиях на ОАО «СПЗ» на бесцентровых шлифовальных станках моделей SASL-200×500, SASL-5AD, SWaAGL-50 и бесцентровых суперфинишных станках моделей SZZ-3, SZASLE-50×500, подтвердили основные теоретические положения работы и сформировали базу данных для статистического моделирования. В частности, установлены эмпирические законы распределения: для амплитуд гармоник – Пирсона первого типа; для начальных фаз гармоник – равномерное; для отклонения от круглости – нормальное, логарифмически нормальное; для отклонения профиля продольного сечения – нормальное.

10. Практическая реализация результатов исследований включает: методики профилирования и правки ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков, методики профилирования и формообразования валков бесцентровых суперфинишных станков, методики оптимальной наладки станков по геометро-кинематическим параметрам, способы измерения отклонений формы деталей типа тел вращения, практические средства по модернизации станков. Методики и технические решения подтверждены 13 патентами на изобретения, прошли апробацию и внедрены на производстве.

Содержание диссертационной работы изложено в 121 научной публикации. Основные положения и выводы представлены в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК Министерства образования и науки РФ

1. Захаров О. В. Повышение точности бесцентрового суперфиниширования / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Погораздов // СТИН. 2001. № 9. С. 3-7.

2. Захаров О. В. Основы повышения точности формообразования на бесцентровых суперфинишных станках / О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Известия вузов. Машиностроение. 2002. № 4. С. 70-74.

3. Захаров О. В. Формообразование поперечного сечения деталей при бесцентровом суперфинишировании / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Погораздов // СТИН. 2002. № 12. С. 24-27.
4. Захаров О. В. Метод измерения круглости детали на основе гармонического анализа / О. В. Захаров, А. В. Кочетков, Д. А. Сысуев // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 10. С. 40-42.
5. Захаров О. В. Наладка бесцентровых суперфинишных станков на основе численного моделирования и оптимизации / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, В. В. Погораздов // Вестник машиностроения. 2003. № 12. С. 48-50.
6. Захаров О. В. Аналитико-имитационная модель бесцентрового суперфинишного формообразования / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Вестник Донского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 23-30.
7. Захаров О. В. Геометро-кинематический синтез суперфинишного формообразования конических деталей / О. В. Захаров // Известия вузов. Машиностроение. 2004. № 2. С. 10-15.
8. Захаров О. В. Гармонический анализ в исследовании процессов формообразования и измерения прецизионных деталей / Б. М. Бржозовский, М. Б. Бровкова, О. В. Захаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2004. № 1. С. 45-52.
9. Захаров О. В. Анализ точности бесцентрового суперфинишного формообразования на основе имитационного моделирования / О. В. Захаров, В. В. Погораздов, Б. М. Бржозовский // Вестник машиностроения. 2004. № 8. С. 51-53.
10. Захаров О. В. Теория расчета валковой системы бесцентрового суперфинишного станка для обработки цилиндрических деталей / О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 11. С. 8-12.
11. Захаров О. В. Расчет валковой системы бесцентровых суперфинишных станков для обработки конических деталей / О. В. Захаров, В. В. Погораздов // СТИН. 2005. № 1. С. 14-16.
12. Захаров О. В. Профилирование ведущего круга при бесцентровом круглом шлифовании цилиндрических деталей / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров // СТИН. 2005. № 4. С. 12-14.
13. Захаров О. В. Исследование формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании бомбинированных деталей / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, А.Ф. Балаев // Известия вузов. Машиностроение. 2005. № 6. С. 31-35.
14. Захаров О. В. Профилирование валков подающего устройства к бесцентровому суперфинишному станку / О. В. Захаров // СТИН. 2005. № 12. С. 8-11.
15. Захаров О. В. Геометрическая модель профилирования валков бесцентрового суперфинишного станка для обработки бомбинированных поверхностей / О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 12. С. 3-5.
16. Захаров О. В. Минимизация периодических погрешностей формообразования при бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах / О. В. Захаров, В. В. Погораздов // СТИН. 2006. № 1. С. 25-28.

17. Захаров О. В. Измерение отклонения от круглости с использованием гармонического анализа / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Контроль. Диагностика. 2006. № 1. С. 49-51.
18. Захаров О. В. Условия силового замыкания контакта при бесцентровом суперфинишировании / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 1. С. 25-27.
19. Захаров О. В. Расчет параметров средней окружности профиля при измерении отклонений формы тел вращения / О. В. Захаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 2. С. 63-69.
20. Захаров О. В. Проектирование валковых устройств бесцентровых суперфинишных станков / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 33-36.
21. Захаров О. В. Наладка бесцентрового суперфинишного станка на обработку поверхности со сложной образующей / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, А. Ф. Балаев // СТИН. 2006. № 4. С. 12-16.
22. Захаров О. В. Обеспечение точности обработки партии заготовок при бесцентровой абразивной обработке на основе статистического моделирования Монте-Карло / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, М. Б. Бровкова и др. // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 4. Вып. 1. С. 12-17.
23. Захаров О. В. Разностное измерение диаметра и отклонения от круглости деталей с использованием гармонического анализа / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 7. С. 27-29.
24. Захаров О. В. Бесцентровое шлифование конических поверхностей на станках с продольной подачей / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 7. С. 14-16.
25. Захаров О. В. Правка ведущего круга бесцентрового шлифовального станка / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 9. С. 20-23.
26. Захаров О. В. Обеспечение точности при бесцентровом шлифовании с поперечной подачей / О. В. Захаров, В. В. Горшков // Автоматизация и современные технологии. 2006. № 10. С. 11-15.
27. Захаров О. В. Обобщенная геометро-аналитическая модель для расчета формообразующей траектории при бесцентровом суперфинишировании / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, А. Ф. Балаев // Известия вузов. Машиностроение. 2006. № 10. С. 11-15.
28. Захаров О. В. Кинематические и силовые аспекты бесцентрового суперфиниширования / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, А. Ф. Балаев // СТИН. 2006. № 11. С. 2-5.
29. Захаров О. В. Бесцентровое шлифование бомбинированных поверхностей роликов подшипников / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 1. С. 3-7.
30. Захаров О. В. Устойчивость бесцентрового шлифования с продольной подачей по силовым параметрам / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. 2007. № 11. С. 9-11.

31. Захаров О. В. Повышение точности бесцентрового шлифования на неподвижных опорах / О. В. Захаров // СТИН. 2008. № 10. С. 5-8.

32. Захаров О. В. Условия устойчивости вращения заготовок при бесцентровом шлифовании с продольной подачей / О. В. Захаров // СТИН. 2008. № 3. С. 6-9.

33. Захаров О. В. Управление точностью при шлифовании деталей подшипников на основе статистического моделирования / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. 2008. № 12. С. 12-15.

34. Захаров О. В. Расчет ведущих кругов бесцентровых шлифовальных станков / О. В. Захаров // Вестник машиностроения. 2009. № 4. С. 77-80.

35. Захаров О. В. Бесцентровое измерение отклонения от круглости высокоточных деталей / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Горшков, М. Э. Автономов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. № 3. Вып. 2. С. 42-45.

36. Захаров О. В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами / О. В. Захаров // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 32-35.

*Публикации в изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК
Министерства образования и науки РФ по смежным специальностям*

37. Захаров О. В. Методические основы гармонического анализа круглограмм / О. В. Захаров, В. В. Погораздов, А. В. Кочетков // Метрология – приложение к журналу «Измерительная техника». 2004. № 6. С. 3-10.

38. Захаров О. В. О точности центрирования при измерении на кругломерах / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Измерительная техника. 2006. № 11. С. 20-22.

Монографии

39. Захаров О. В. Проектирование формообразующих систем бесцентровых суперфинишных станков: монография / О. В. Захаров, В. В. Погораздов, Б. М. Бржозовский. Саратов: СГТУ, 2004. 140 с. [Рецензии: В. А. Гречишников, И. Б. Челпанов].

40. Захаров О. В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке: монография / О. В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2006. 152 с. [Рецензии: А. В. Королев, И. Б. Челпанов].

41. Захаров О. В. Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке: монография / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров. Саратов: СГТУ, 2010. 216 с. [Рецензии: А. А. Игнатьев, М. А. Тамаркин].

Патенты на изобретения и полезные модели

42. Пат. RU № 2201862 МПК В 24 В 35/00, 1/00. Способ бесцентрового суперфиниширования круговых поверхностей / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, В. В. Погораздов // БИ. 2003. № 10.

43. Пат. RU № 2212994 МПК В 24 В 35/00, 1/00. Валки бесцентровых суперфинишных станков и способ их изготовления / О. В. Захаров, А. М. Чистяков, Б. М. Бржозовский, В. В. Погораздов и др. // БИ. 2003. № 27.

44. Пат. RU № 2239539 МПК В 24 В 35/00. Способ наладки бесцентрового суперфинишного станка / О. В. Захаров, В. А. Лукьянов // БИ. 2004. № 31.

45. Пат. RU № 2239785 МПК G 01 B 5/20, 5/08. Способ разностного измерения отклонения от круглости / О. В. Захаров, А. В. Кочетков, Д. А. Сысуев // БИ. 2004. № 31.

46. Пат. RU № 2240496 МПК G 01 B 5/008. Способ измерения поперечного профиля изделия / О. В. Захаров, А. В. Кочетков // БИ. 2004. № 32.

47. Пат. RU № 2243499 МПК G 01 B 5/20. Способ измерения поверхностей вращения на кругломере / О. В. Захаров, А. В. Кочетков, В. В. Погораздов // БИ. 2004. № 36.

48. Пат. RU № 43209 МПК В 24 В 5/18. Бесцентровый круглошлифовальный станок / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, В. В. Горшков // БИ. 2005. № 1.

49. Пат. RU № 2253559 МПК В 24 В 35/00. Станок для бесцентровой суперфинишной обработки цилиндрических изделий / О. В. Захаров, А. Ф. Балаев, А. В. Кочетков // БИ. 2005. № 16.

50. Пат. RU № 48294 МПК В 24 В 5/37. Устройство для суперфиниширования бомбинированных роликов / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский, А. Ф. Балаев // БИ. 2005. № 28.

51. Пат. RU № 2267088 МПК G 01 B 21/10, 5/08. Способ измерения диаметра изделия / О. В. Захаров, А. В. Кочетков, Д. А. Сысуев // БИ. 2005. № 36.

52. Пат. RU № 2278014 МПК В 24 В 1/00, 5/16. Способ шлифования вала бесцентрового суперфинишного станка / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // БИ. 2006. № 17.

53. Пат. RU № 73634 МПК В 24 В 5/14. Бесцентровый шлифовальный станок для обработки конических поверхностей / О. В. Захаров // БИ. 2008. № 15.

54. Пат. RU № 78112 МПК В 24 В 35/00. Бесцентровый суперфинишный станок / О. В. Захаров, А. Ф. Балаев // БИ. 2008. № 32.

Публикации в других изданиях

55. Захаров О. В. Новый подход к анализу процесса формообразования при бесцентровом суперфинишировании / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Конструкторско-технологическая информатика: труды Международного Конгресса: в 2 т. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2000. Т. 1. С. 80-83.

56. Захаров О. В. Оптимизация наладочных параметров бесцентровых суперфинишных станков / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Погораздов // Качество машин: труды Международ. науч.-техн. конф. Брянск: БГТУ, 2001. С. 122-123.

57. Захаров О. В. Моделирование формообразования поперечного сечения деталей гармоническим методом при бесцентровом суперфинишировании / О. В. Захаров // Надежность и качество: труды Международ. симпозиума. Пенза: ПГУ, 2001. С. 398-400.

58. Захаров О. В. Формообразование нелинейчатой винтовой поверхности валков бесцентровых суперфинишных станков / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы: сб. ст. Международ. науч.-техн. конф. Волжский: ВолгГАСА, 2003. С. 195-200.

59. Захаров О. В. Измерение диаметра деталей с учетом отклонения от круглости / О. В. Захаров // Фундаментальные и прикладные проблемы приборостроения, информатики, экономики и права: труды Международ. науч.-практ. конф. М.: МГАПИ, 2003. С. 90-94 (Серия «Приборостроение»).

60. Захаров О. В. Погрешности бесцентрового измерения отклонения от круглости деталей машин / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Измерение, контроль, информатизация: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Барнаул: АГТУ, 2004. С. 23-26.

61. Захаров О. В. Настройка валковой системы бесцентрового суперфинишного станка для обработки бомбинированных роликов подшипников / Б. М. Бржозовский, А. Ф. Балаев, О. В. Захаров // Высокие технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Самара: СамГТУ, 2004. С. 94-96.

62. Захаров О. В. Оптимальная наладка бесцентровых суперфинишных станков / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Динамика технологических систем: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2004. С. 139-142.

63. Захаров О. В. Минимизация погрешностей базирования при бесцентровом шлифовании и суперфинишировании / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Конструкторско-технологическая информатика: труды Междунар. конгресса. М.: Изд-во МГТУ «Станкин», 2005. С. 93-96.

64. Захаров О. В. Анализ профиля цилиндрической поверхности с учетом отклонений формы / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГТУ, 2005. С. 252-253.

65. Захаров О. В. Статистическое моделирование и минимизация погрешностей базирования при бесцентровом шлифовании / Б. М. Бржозовский, В. В. Горшков, О. В. Захаров // Автоматизация технологических процессов и производственный контроль: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Тольятти: ТГУ, 2006. С. 101-104.

66. Захаров О. В. Расчет профиля ведущего круга бесцентрового шлифовального станка при обработке бомбинированных поверхностей / О. В. Захаров, Ю. В. Кисметов // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2007. С. 35-39.

67. Захаров О. В. Способ шлифования валка бесцентрового суперфинишного станка / О. В. Захаров, Б. М. Бржозовский // Изобретатели – машиностроению. 2008. № 6. С. 13-15.

68. Захаров О. В. Комплексное обеспечение точности при бесцентровом суперфинишировании деталей подшипников качения / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, А. Ф. Балаев // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГТУ, 2008. С. 163-164.

69. Захаров О. В. Кинематика бесцентрового шлифования с продольной подачей / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров, В. В. Горшков // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч. Курск: КГТУ, 2009. Ч. 1. С. 48-52.

70. Захаров О. В. Принципы наладки бесцентровых суперфинишных станков на основе оптимизации геометро-кинематических параметров / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2010. С. 17-20.

ЗАХАРОВ Олег Владимирович

ОБОСНОВАНИЕ И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДОЛОГИИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПРОФИЛИРОВАНИЯ РАБОЧИХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ
ПРИ БЕСЦЕНТРОВОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ

Автореферат

Корректор О.А. Панина

Подписано в печать 12.07.10

Бум. офсет.

Тираж 100 экз.

Усл. печ.л. 2,0

Заказ 255

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд.л. 2,0

Бесплатно

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77