На правах рукописи

Родионова Ольга Владимировна

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ НА ЖЕСТКИХ ОПОРАХ КОЛЕЦ ПРИБОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ульяновск – 2017

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский Государственный Технический университет» (ФГБОУ ВО «СамГТУ»)

Научный руководитель: **Носов Николай Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Полянчиков Юрий Николаевич**
доктор технических наук, профессор кафедры "Технология машиностроения" ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

Зверовщиков Владимир Зиновьевич
доктор технических наук, профессор кафедры "Технология машиностроения" ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева" (Самарский университет)

Защита диссертации состоится «9» ноября 2017 г. в 14.30 на заседании объединенного диссертационного совета Д999.003.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «УлГТУ», почтовый адрес: 432027, ГСП, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32) и федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТГУ», почтовый адрес: 445667, ГСП, г. Тольятти, ул. Белорусская, д. 14) по адресу: г. Ульяновск, ул. Энгельса, 3, первый учебный корпус, ауд. 117.

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

Автореферат разослан «___»_____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Н. И. Веткасов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В практике современного производства приборных подшипников происходит постоянное ужесточение требований к долговечности, надежности и точности геометрических параметров деталей. При изготовлении прецизионных деталей основная трудоемкость приходится на операции шлифования колец подшипников, которые обеспечивают требуемую производительность процесса и формируют основные геометрические параметры точности и качества поверхностей. Профильное шлифование на жестких опорах дорожек качения внутренних колец приборных подшипников применяют на заключительном этапе технологического процесса благодаря его высокой производительности, технологической надежности и возможности полной автоматизации. Наибольшие трудности вызывает стабильное обеспечение геометрических параметров точности, качества дорожек качения колец и отсутствия дефектов на рабочих поверхностях деталей подшипников в зависимости от следующих технологических факторов: схемы и режимов шлифования, состояния оборудования, состава технологических сред, характеристики шлифовальных кругов, изменяющейся силовой, динамической и температурной ситуации в процессе шлифования.

Повышение точности и качества поверхностей колец подшипников сопровождается неуклонным ужесточением требований к достоверности результатов их измерения, к точности измерительных приборов и методам обработки данных.

В связи с этим повышение производительности процесса шлифования и обеспечение требуемых геометрических параметров микрорельефа обработанных поверхностей при бездефектном шлифовании дорожек качения внутренних колец приборных подшипников является актуальной проблемой.

Целью работы является повышение производительности обработки, обеспечение точности и качества поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников при шлифовании на жестких опорах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены **следующие задачи**:

1. Проведен анализ существующего технологического процесса профильного шлифования дорожек качения внутренних колец подшипников на жестких опорах и определены пути повышения его производительности.
2. Разработана конечно-элементная модель процесса профильного шлифования дорожек качения внутренних колец приборных подшипников на жестких опорах, учитывающая режимы обработки и параметры наладки.
3. Разработана методика оценки микрогеометрии и дефектов поверхности при шлифовании дорожек качения колец подшипников на жестких опорах с использованием оптико-электронного комплекса.
4. Проведены исследования влияния СОЖ на производительность обработки и геометрические параметры точности и качества поверхности

(шероховатость, волнистость, точность формы, дефекты, прижоги и др.) при профильном шлифовании дорожек качения внутренних колец подшипников.

5. Исследовано влияние чистоты СОЖ на образование дефектов поверхностей дорожек качения при профильном шлифовании.

6. Определены оптимальные режимы обработки при профильном шлифовании дорожек качения внутренних колец подшипников в зависимости от геометрических параметров точности и качества поверхности, состава и чистоты СОЖ.

7. Проведены технико-экономический анализ и опытно-промышленная проверка, результаты исследования внедрены в производство.

8. Внедрен в действующее производство на операции шлифования оптико-электронный комплекс для исследования микрогеометрии и дефектов поверхности дорожек качения колец прецизионных подшипников.

Основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту:

1. Конечно-элементная модель и результаты теоретических исследований процессов деформации и образования отклонения от круглости дорожек качения колец подшипников при шлифовании на жестких опорах.

2. Методика определения шероховатости и дефектов на рабочей поверхности внутренних колец подшипников оптико-электронным комплексом на основе создания квазиоптимальных корреляционных алгоритмов.

3. Регрессионные зависимости, связывающие параметры шероховатости поверхности *Ra*, *Rz*, *Rmax* дорожек качения внутренних колец приборных подшипников с амплитудой автокорреляционной функции.

4. Результаты экспериментального исследования влияния состава и чистоты СОЖ на производительность шлифования на жестких опорах колец приборных подшипников.

5. Результаты экспериментального исследования влияния режимов шлифования, а также состава и чистоты СОЖ на качество поверхности и образование дефектов при шлифовании.

6. Системно-структурный подход к оптимизации процесса профильного врезного шлифования, в котором обобщены и дополнены технические ограничения по следующим исходным данным: амплитуде автокорреляционной функции поверхности дорожки качения, допустимому отклонению от круглости дорожки качения и температуре шлифования.

Практическая значимость работы заключается:

1. В разработке и внедрении оптико-электронного комплекса для исследования шероховатости и дефектов поверхности дорожек качения колец подшипников, полученных при шлифовании.

2. В определении оптимальных режимов профильного шлифования дорожек качения в зависимости от СОЖ. Установлено, что применение водной СОЖ вместо масляной повышает производительность шлифования в 1,7 – 2,0 раза.

3. В уменьшении брака по дефектам на рабочей поверхности внутренних колец подшипников с 5% при шлифовании с применением масляной СОЖ до

1…1,5 % при использовании водной СОЖ.

4. Во внедрении результатов исследований при изготовлении приборных подшипников на ООО «Завод приборных подшипников» (ООО «ЗПП», г. Самара) с общим экономическим эффектом 216180 руб.

5. Во внедрении результатов научно-исследовательских работ в учебный процесс при проведении лабораторных работ и выполнении магистерских диссертаций по направлению 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Методология и методы исследований. Достижение цели и решение поставленных задач в работе обеспечены применением современных методов исследований, базирующихся на основных положениях технологии машиностроения, математического моделирования с использованием численно-аналитических методов, теории измерений и погрешностей, теории корреляционного анализа, теории вероятностей и математической статистики.

Экспериментальные исследования проведены на промышленном оборудовании при шлифовании колец подшипников. Качество поверхности исследовали в измерительной лаборатории ООО «ЗПП» с использованием аттестованных измерительных средств, а также с применением оптико-электронного комплекса и методов регрессионного и дисперсионного анализов.

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов подтверждается корректным сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, применением современных методик и оборудования. Результаты диссертационной работы апробированы и приняты к внедрению на предприятии: ООО «Завод приборных подшипников» (г. Самара).

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских научно-технических конференциях: «Высокие технологии в машиностроении» (г. Самара, 2011, 2012, 2013, 2014 г.г.); «Современные компьютерные технологии фирмы «Delcam» в науке, образовании и производстве» (г. Самара, 2013 г.); «Научно-техническое творчество: проблемы и перспективы» (г. Самара, 2014 г.); «Актуальные проблемы автотранспортного комплекса» (г. Самара, 2014 г.); «Актуальные проблемы трибологии технических, энергетических и транспортных машин» (г. Самара, 2014 г.); «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» (г. Самара, Самарский университет имени ак. С. П. Королева, 2016 г.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа содержит в себе решение актуальной научно-технической задачи – повышение производительности, обеспечение точности и качества операции профильного шлифования дорожек качения внутренних колец приборных подшипников на жестких опорах. Содержание исследований соответствует специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». Области исследования: № 2 (теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических

воздействий).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано четырнадцать печатных работ, в том числе три публикации в изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и рекомендаций, списка использованной литературы из 125 наименований, изложена на 137 страницах, содержит 10 таблиц, 53 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулированы основные научные положения, составляющие научную новизну работы и выносимые на защиту, представлена ее теоретическая и практическая значимости, направленные на решение научно-технической задачи – повышение производительности операции профильного шлифования дорожек качения внутренних колец подшипников на жестких опорах на основе оптико-электронного контроля микрогеометрических параметров дорожек качения.

В первой главе произведен анализ особенностей формообразования поверхности при обработке колец подшипников шлифованием на жестких опорах. Рассматривались параметры точности и качества поверхностности, влияющие на эксплуатационные свойства. Проведен анализ многочисленных теоретических и экспериментальных исследований отечественных, а также зарубежных авторов, по влиянию состава и качества СОЖ на процесс шлифования, рекомендаций по решению задач проектирования операций шлифования, обеспечивающих требуемую производительность, себестоимость процесса, заданную точность обработки и формирование поверхности высокого качества.

Изучен теоретический анализ процесса шлифования дорожек качения колец подшипников на жестких опорах, произведенный в работах И.П. Кузнецова, В.П. Филькина, И.Б. Колтунова, Б.М. Бржозовского, О.В. Захарова и др. Проведенный анализ позволил сделать выводы, что наибольшее влияние на производительность обработки, точность и качество шлифованных поверхностей дорожек качения оказывают силовые и тепловые деформации, а также условия обработки колец подшипников на жестких опорах.

Предложены следующее пути повышения производительности операции шлифования дорожек качения внутренних колец на жестких опорах:

1. Создание математических моделей для определения положения регулируемой опоры при шлифовании.

2. Оптимизация режимов профильного шлифования дорожек качения колец в зависимости от шероховатости поверхности, упругой деформации колец подшипников и температуры шлифования.

3. Применение новых высокоточных измерительных средств, позволяющих оперативно получать и обрабатывать данные о микрогеометрии шлифованных поверхностей дорожек качения.

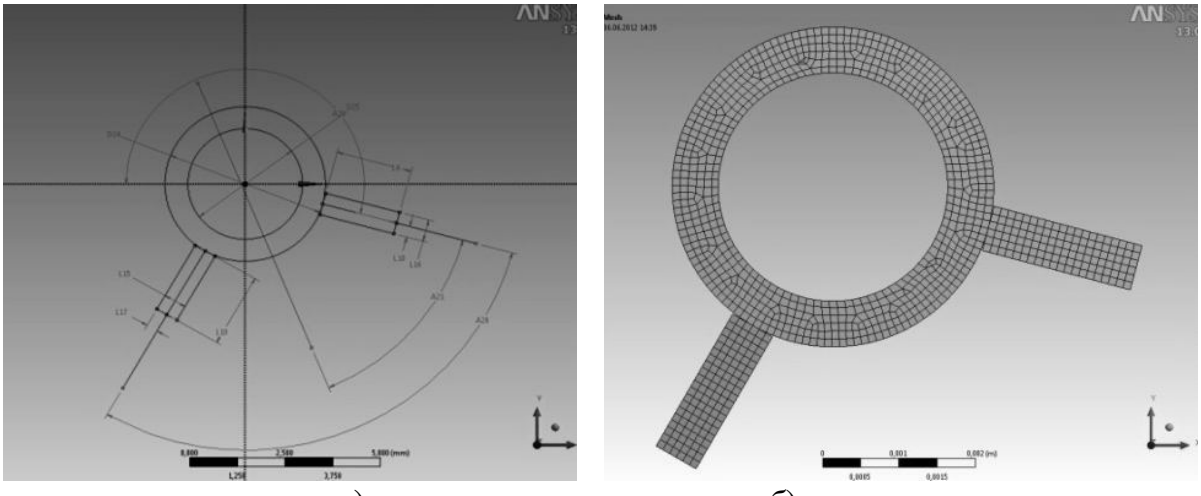
4. Определение условий бездефектного шлифования и снижения брака при

изготовлении колец подшипников за счет применения СОЖ.

Во второй главе рассмотрены вопросы влияния режимов и условий обработки на формирование деформаций кольца подшипника в процессе шлифования. При шлифовании дорожек качения внутренних колец подшипников существенные сложности вызывает стабильное обеспечение величины отклонения от круглости, которое в ряде случаев выходит за пределы поля допуска.

Разработанная в программном пакете ANSYS конечно-элементная модель процесса шлифования дорожки качения внутреннего кольца подшипника на жестких опорах позволила исследовать его напряженно-деформированное состояние. Программный комплекс ANSYS основывается на использовании метода конечных элементов (МКЭ), который является в настоящее время одним из основных методов решения вариационных задач, в том числе расчета напряженно-деформированного состояния поверхностей.

Расчетную модель, применяемую для проведения статического анализа кольца подшипника, создавали на основе схемы действия сил при шлифовании на неподвижных опорах, разработанной проф. Захаровым О. В. (рис.1а). Исходные данные для моделирования: материал внутреннего кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65, наружный диаметр – 4,2 мм, внутренний диаметр – 3 мм, ширина – 2,5 мм, угол $\beta = 105°$, угол α изменяется от 5° до 20°(при $\alpha < 5°$ – образуются условия вырова кольца с жестких опор силами резания, при $\alpha > 20°$ – кольцо занимает неустойчивое положение). Моделирование в программном пакете ANSYS включало следующие этапы: задание физических свойств материала кольца (сталь ШХ15); построение расчетной модели для каждого варианта положения жестких опор; разбиение модели на конечные элементы (рис.1б); приложение граничных условий и силовой нагрузки; задание параметров циклов нагружения модели; вывод результатов решения.



а) *б*)

Рис.1. Расчетная (*а*) и конечно-элементная (*б*) модели процесса шлифования дорожки качения внутреннего кольца подшипника на жестких опорах

Нагрузки для проведения статического анализа представляли в виде векторов сил резания, которые направлены в обратную сторону оси UY. Для

удобства обработки полученных результатов использовали локальную систему координат, что позволило получать положительные значения исследуемых величин.

В процессе моделирования изменяли положение подвижной опоры (α = 5°, 10°, 15°, 20°) и величину врезной подачи S =0,15, 0,3 мм/мин (чистовая обработка), S = 0,45, 0,6 мм/мин (черновая обработка). Анализ результатов исследования показал, что деформация кольца подшипника изменяется в зависимости от углового положения жестких опор и режимов шлифования. На рис. 2 показано изменение величин деформаций, возникающих в кольце, при различных условиях шлифования.

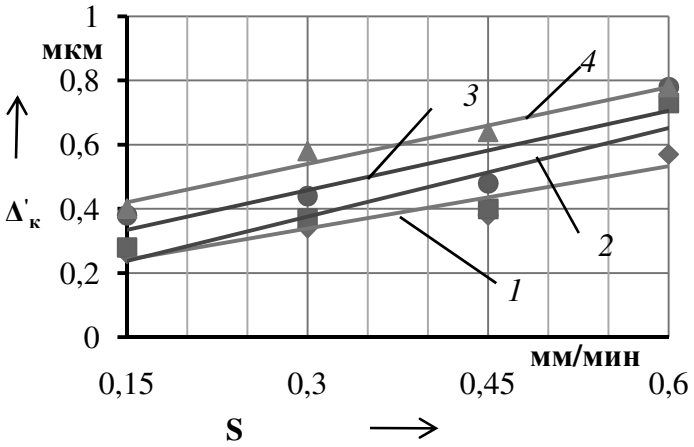


Рис.2. Зависимость деформации кольца $\Delta'_К$ подшипника от величины врезной подачи S и угла α: *1* – при угле α = 5°, *2* – при угле α = 10°; *3* – при угле α = 15°; 4 – при угле α = 20°

Анализ полученных результатов показал, что наибольшее влияние на деформацию кольца оказывают режимы шлифования, деформации от которых являются доминирующими. Как показал анализ результатов, с увеличением подачи S и угла α эквивалентные напряжения повышаются. При этом минимальные значения деформаций и напряжений получены при изменении угла α от 5 до 10° и на чистовых режимах шлифования.

Исследования по предложенной модели взаимодействия ШК и кольца подшипника показали, что возникающие при шлифовании силовые нагрузки формируют в поверхностном слое обрабатываемой поверхности эквивалентные напряжения, которые с увеличением врезной подачи повышаются и вызывают деформацию нежестких колец. Таким образом, можно предположить, что отклонение от круглости кольца подшипника при шлифовании на жестких опорах формируется под действием 3-х факторов: упругих деформаций кольца в процессе шлифования, отклонения от круглости базовой поверхности кольца подшипника и погрешности базирования кольца подшипника при установке на жесткие опоры.

В дальнейшем необходимо провести экспериментальные исследования по влиянию деформаций, полученных при шлифовании, на отклонение от круглости.

В третьей главе представлена методика и результаты оптико-электронного исследования параметров микрогеометрии и дефектов поверхности дорожек качения внутренних колец подшипников после обработки шлифованием.

В исследовании был использован оригинальный метод оценки микрогеометрии и дефектов поверхности с помощью исследовательского

комплекса, который включает оптико-электронные средства и программное обеспечение, позволяющее обрабатывать видеоизображения исследуемых поверхностей в соответствии с разработанной методикой.

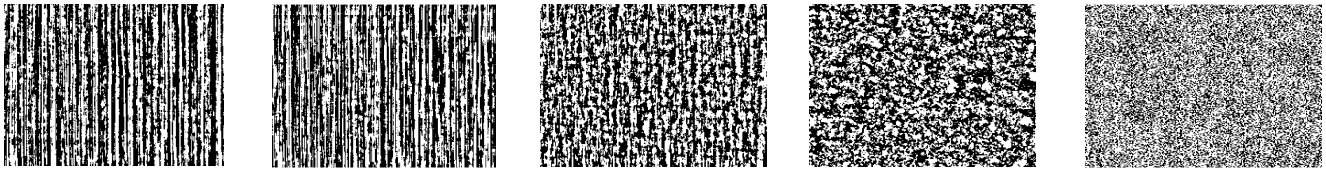
Оптико-электронная система была настроена таким образом, что анализируемая поверхность образца кольца подшипника размером Ø4,2×2,5 мм находилась под видеокамерой. Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом 45°. Формат видеокадра при оценке видеоизображений поверхности дорожки качения составлял 100×120 пикселей. Для определения признаков, по которым можно достаточно надежно идентифицировать исследуемую поверхность, задавали базовое окно (эталон), и в этом окне подсчитывали средней уровень яркости $B_{ср}$. С этим уровнем яркости сравнивали значение яркости B_i центрального элемента этого окна и производили расчет коэффициента корреляции. После этого окно перемещали на 1 пиксель вправо и производили преобразование следующего центрального элемента в этом окне. Таким образом, преобразовывали исходный многоградационный кадр, и в результате получали бинарный кадр формата 100×120 пикселей.

Затем бинарные изображения поступали для дальнейшей обработки и преобразования в корреляционную поверхность. При каждом совмещении эталона $u(n_1,n_2)$ и текущего фрагмента полутонового изображения $x(n_1,n_2)$ подсчитывали коэффициент корреляции по формуле:

$$r_{xy}(k_1,k_2)=\frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1}\sum_{n_2=0}^{N_2-1}(u(n_1,n_2)-m_u)\cdot(x(n_1-K_1,n_2-K_2)-m_x)}{\sigma_1\cdot\sigma_2}, \qquad (1)$$

где (n_1,n_2) индексы элементов в окне эталона, (k_1,k_2) – координаты эталона внутри зоны поиска k_1xk_2, а σ_1 и σ_2− средние квадратические отклонения величин $u(n_1,n_2)$ и $x(n_1,n_2)$ от их математических ожиданий m_u и m_x соответственно.

Бинарные изображения, по которым проводили исследования микрорельефов дорожки качения, представлены на рис.3. Из приведенных данных видно, что с уменьшением шероховатости поверхности доля случайной компоненты микрорельефа увеличивается, а характер поверхности изменяется от однонаправленного до стохастического.



Ra = 0,56 мкм кольцо № 1 | *Ra* = 0,13 мкм кольцо № 2 | *Ra*= 0,084 мкм кольцо № 3 | *Ra* = 0,048 мкм кольцо № 4 | *Ra*= 0,025 мкм кольцо № 5

Рис.3. Бинарные изображения микрорельефа поверхности исследуемых колец

Для колец приборных подшипников были выполнены исследования влияния шероховатости поверхности дорожек качения на параметры корреляционных функций, вычисленных по выражению (1). Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости по идентификации микрогеометрии поверхности прецизионных деталей подшипника

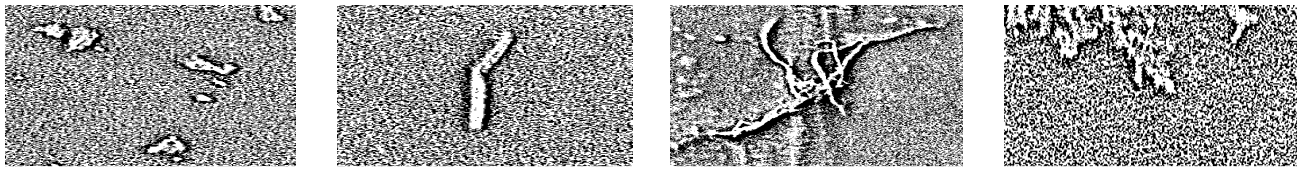
(дорожек качения внутренних колец) на основе вычисления номинальных значений параметров шероховатости *Ra*, *Rz*, *Rmax* в зависимости от средней амплитуды автокорреляционной функции:

$$Ra = 0{,}0391 \cdot A_{cp} - 0{,}4794, \text{ мкм},$$
$$Rz = 0{,}16 + 0{,}045 \times A_{ср}, \text{ мкм}, \quad (2)$$
$$Rmax = 0{,}84 + 0{,}056 \times A_{ср}, \text{ мкм}.$$

Таким образом, оптико-электронный комплекс позволяет определить среднюю амплитуду колебания автокорреляционной функции $A_{ср}$ и рассчитать параметры шероховатости поверхности с использованием аналитических зависимостей (2).

Исследования показали, что величина шероховатости поверхности *Ra*, рассчитанная по формуле (2), больше на 15…20 %, чем шероховатость профиля поверхности, определенная контактным методом. Это связано с тем, что при анализе шероховатости по новой методике учитывалось влияние дефектов, полученных при шлифовании.

Проведены исследование дефектов на поверхности дорожек качения с помощью оптико-электронного комплекса. Партия колец из 500 шт. была обработана по заводской технологии с применением масляной СОЖ. Исследования показали, что на поверхности колец были обнаружены дефекты. Типичные дефекты на поверхности дорожки качения приведены на рис.4.



а) *б)* *в)* *г)*

Рис.4. Дефекты на поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников после операции шлифования с применением масляной СОЖ, увеличение х 50: а) вкрапление осколков зерен в поверхность; б) микропроточина; в) налипание обрабатываемого материала (стружки) на поверхность; г) наплыв

По результатам проведенных исследований были выделены следующие дефекты на рабочей поверхности дорожки качения колец подшипников: 1 – вкрапление осколков зерен в поверхность; 2 – наплыв; 3 – несплошности; 4– микропроточины; 5 – налипание обрабатываемого материала (стружки) на поверхность; 6 – пропахивание; 7 – лунка; 8 – выкрашивание; 9 – локальные разрушения. Экспериментальные исследования показали, что основные факторы, влияющие на образование дефектов при шлифовании следующие: окружная скорость заготовки, м/мин (1); врезная черновая подача, мм/мин (2); врезная чистовая подача, мм/мин (3); выхаживание, с (4); врезная подача при правке, мм/дв. ход (5); состав СОЖ (6); чистота СОЖ (7).

Для оценки влияния дефектов приняли степень относительной значимости дефектов, которую определяли по результатам их попарного сравнения между собой по некоторой совокупности признаков K_i, %.

Из проведенных исследований видно, что наиболее значимыми факторами, влияющими на образование дефектов, являются факторы 2, 5, 6, 7 с $K_i = 6{,}2 - 11{,}1$ %, т.е. врезная подача при правке ШК, врезная черновая подача при шлифовании, состав и качество очистки СОЖ.

В четвертой главе представлены методика и результаты экспериментальных исследований операции профильного шлифования дорожек качения внутренних колец приборных подшипников в зависимости от состава СОЖ. Технология обработки дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника 2000083S, применяемая в исследованиях, соответствовала технологической операционной карте, разработанной на заводе ООО «ЗПП».

В процессе исследования определяли эффективность очистки СОЖ на операциях врезного круглого наружного шлифования внутренних колец подшипников по ГОСТ Р 50558. По результатам очистки масляной СОЖ (табл.1), установлено, что данная система, применяемая на предприятии ООО «ЗПП», не удовлетворяет техническим стандартам, а модернизация системы потребует значительных материальных затрат. В работе предложено использовать при шлифовании дорожек качения колец приборных подшипников водную СОЖ – 3%-ую эмульсию АРС – 21М. Установка по очистке водной СОЖ обеспечила качественную очистку СОЖ от крупных абразивных частиц, микростружки и комков (путанки) из нее, а также от крупных фрагментов микростружки и соответствовала принятым стандартам (табл. 1).

Таблица 1

Результаты очистки масляной и водной СОЖ

Критерии очистки	Норма по ГОСТ Р 50558	Масляная СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%)	Водная СОЖ (3% – ная эмульсия АРС – 21М)
C_o, г/л	0,1	0,15…0,16	0,05…0,060
ε, %	0,99	0,97…0,98	0,995
$d_{0,}$ мкм	5	10…15	до 5

Проведены сравнительные исследования процессов шлифования дорожек качения колец подшипников при применении двух составах СОЖ – масляной и водной, а также получены результаты оценки влияния чистоты СОЖ на качество поверхности дорожек качения колец подшипников. В качестве образцов применяли внутренние кольца приборных подшипников № 2000083S (не менее 300 колец в партии).

Исследованиями установлено, что при шлифовании с применением масляной СОЖ погрешность профиля составила от 1,6 до 2,7 мкм, а при

шлифовании с водной СОЖ – 1,2 – 1,4 мкм (рис.5). На наш взгляд, это связано с тем, что повысилась эффективность работы абразивного зерна при шлифовании с водной СОЖ за счет увеличения толщины снимаемого слоя.

Проведены исследования влияния времени работы абразивного инструмента на поперечную шероховатость поверхности дорожки качения (рис.6). Из приведенных данных видно, что при шлифовании с масляной СОЖ шероховатость имеет большой разброс от Rz = 1,1 – 1,2 мкм до Rz = 0,45 – 0,6 мкм. При шлифовании с водной СОЖ шероховатость поверхности достигает Rz = 0,6 – 0,7 мкм при допустимом значении Rz = 0,8 мкм. Установлено, что среднее квадратическое отклонение шероховатости поверхности колец после обработки с водной СОЖ значительно меньше, что говорит о большей стабильности процесса и о равномерном износе рабочей поверхности инструмента.

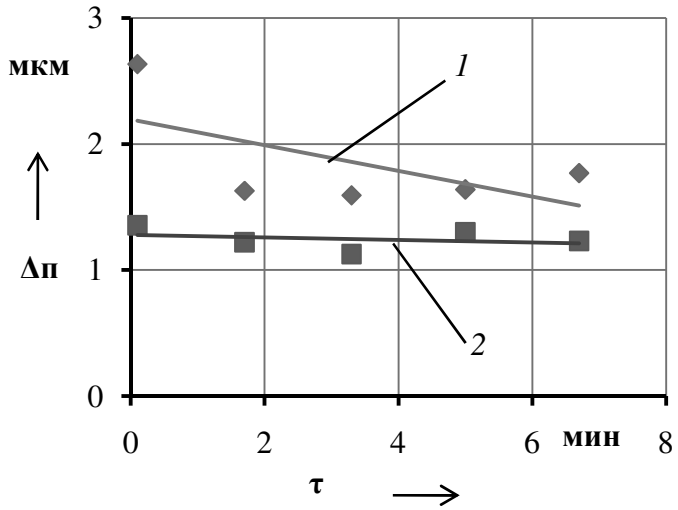


Рис.5. Зависимость отклонения от профиля дорожки качения от состава СОЖ и времени работы шлифовального круга (ШК) между правками: материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол β = 105°; угол α = 5° ÷ 10; $V_к$ = 34,4 м/с; $V_{черн}$ = 40 м/мин; $V_{чист}$ = 33 м/мин;$S_{черн}$ = 0,9 мм/мин; $S_{чист}$ = 0,2 мм/мин; круг 1–355 х 8 х 200 91А F320 М 9 V2 2; правящий инструмент: алмазный карандаш Ц2; *1* – масляная СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%); *2* – водоэмульсионная СОЖ (3% - ная эмульсия АРС – 21М)

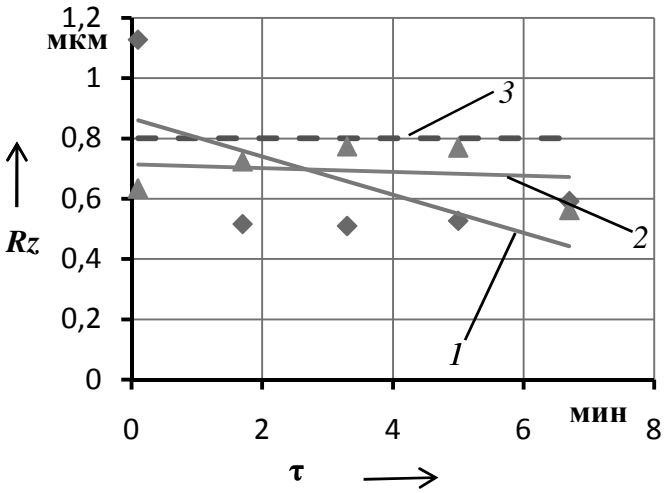


Рис.6. Зависимость шероховатости поверхности дорожки качения при шлифовании от времени работы ШК между правками: *1* – с применением масляной СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%); *2* – с применением водной СОЖ (3 - ная эмульсия АРС – 21М); *3* – максимально допустимое значение Rz по технологическому процессу (условия эксперимента см. рис.5)

Проведены исследования влияния состава СОЖ на волнистость поверхности. Исследования показали, что волнистость практически не зависят от состава СОЖ, т.к. связаны с автоколебаниями технологической системы –

станок, приспособление, инструмент и наладкой жестких опор перед шлифованием.

Проведены экспериментальные исследования влияния врезной подачи на отклонение от круглости дорожек качения колец подшипников. На рис.7 показаны значения деформации кольца в зависимости от врезной подачи и угла $\alpha = 5^{\circ} - 20^{\circ}$ (глава 2), полученные в результате расчетов, и значения отклонения от круглости колец подшипников, полученные за цикл обработки при шлифовании с водной СОЖ.

Обработка результатов исследования показала, что максимальный коэффициент корреляции (R_2 = 0,95) получен при сравнении отклонения от круглости с деформаций кольца при угле α от 5° до 10°.

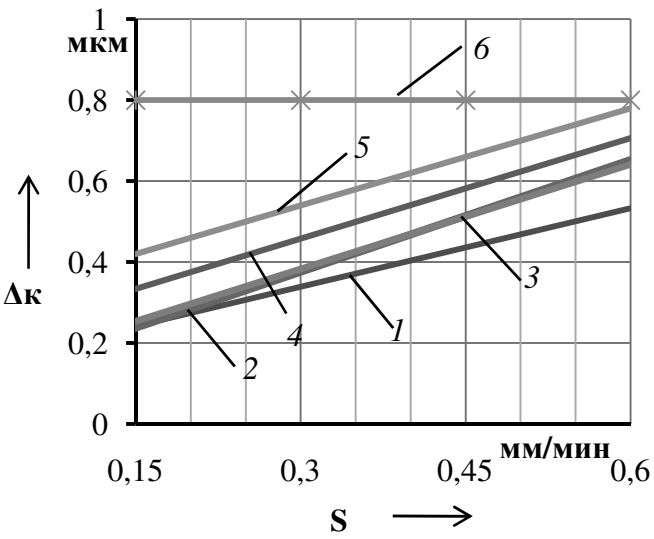


Рис.7. Зависимость величины деформации кольца в процессе шлифования и отклонения от круглости дорожек качения от врезной подачи и угла α: *1* – значения деформации кольца при $\alpha = 5^{\circ}$; *2* – значения деформации кольца при $\alpha = 10^{\circ}$; *3* – экспериментальные значения отклонения от круглости при $\alpha = 10^{\circ}$; *4* – значения деформации кольца при $\alpha = 15^{\circ}$; *5* – значения деформации кольца при $\alpha = 20^{\circ}$; *6* – максимально допустимое значение отклонения от круглости по ТП

Таким образом, подтверждено, что на отклонение от круглости кольца подшипника при шлифовании на жестких опорах действует три фактора: упругие деформаций кольца в процессе шлифования, отклонение от круглости базовой поверхности кольца подшипника и погрешности базирования кольца подшипника при установке на жесткие опоры.

Применение водной СОЖ стабилизировало разброс значений таких параметров качества поверхности, как отклонение от круглости и шероховатость поверхности за период между правками круга. Значения высот волнистости практически не изменились, в тоже время величина отклонения от профиля в осевом сечении снизилась с 2,1 мкм (по сравнению со шлифованием с масляной СОЖ) до 1,3 мкм, т.е. в 1,6 раза.

В пятой главе разработана модель оптимизации режимов шлифования дорожек качения колец приборных подшипников на жестких опорах с применением масляной и водной СОЖ. Шлифование наружной поверхности дорожки качения внутреннего кольца осуществляли на станках Bryant 1-M, на операции использовался абразивный круг 91AF320M9V22 (91А М40 С19К22), с размерами 355х16х127 мм.

В соответствии с целью исследования главной задачей является достижение максимальной производительности шлифования Q мм^3/мин. При профильном шлифовании кольца подшипника с врезной подачей производительность определяется по формуле:

$$Q = 10^3 \cdot V_1 \cdot l_3 \cdot S_2 \rightarrow max, \quad (3)$$

где l_3 – длина (ширина) шлифуемой поверхности, мм; S_2 – врезная подача в мм/об заготовки, V_1– окружная скорость заготовки, м/мин.

Таким образом, производительность процесса шлифования при постоянной величине l_3 зависит от двух режимных параметров: V_1 и S_2. В работе предложена система линейных уравнений в зависимости от требуемых технических ограничений.

Ограничение 1. Связано с предельно допустимой амплитудой автокорреляционной функции, образованием дефектов на дорожке качения кольца подшипника и шероховатостью поверхности, т.е. $A_{ср} \leq [A_{ср}] = 24$ ($Rz = 0{,}8$ мкм), $A_{ср} \leq [A_{ср}] = 20$ ($Rz = 0{,}6$ мкм), $A_{ср} \leq [A_{ср}] = 16$ ($Rz = 0{,}4$ мкм)

$$V_1^{ya} \cdot S_2^{za} \leq \frac{A_{cp} \cdot V_k^{Xa} \cdot d^{\mu}}{C_a \cdot B_k^{Ua} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}, \quad (4)$$

где $A_{ср} = [A_{ср}]$, $V_k = 54$ м/с, $d = 4{,}2$ мм, $\mu = 0{,}2$, $Ca = 20$, $B_k = 1{,}2$ мм, $x_a = 0{,}9$, $y_a = 0{,}7$, $z_a = 0{,}45$, $K_2 = 1{,}8$, $K_3 = 1{,}4$, $K_4 = 1$, при шлифовании с применением масляной СОЖ, $K_1 = 1{,}4$, при шлифовании с применением водной СОЖ, $K_1 = 1{,}0$

Ограничение 2. Связано с деформацией кольца в процессе шлифования на жестких опорах. Допустимая деформация кольца обеспечивается следующим условием:

$$\frac{P_y \cdot d_3^3}{50 \cdot E \cdot I} \leq [f_{max}], \quad (5)$$

где $[f_{max}]$ – допускаемое отклонение от круглости дорожки качения, назначается техническими условиями обработки колец, мм.

$$V_1^r \cdot S_2^y \leq \frac{E \cdot I \cdot [f_{max}] \cdot V_K}{20 \cdot C_N \cdot d_3^{(3+q)} \cdot B_3 \cdot K_q \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7}, \quad (6)$$

где $\mu_U = 0{,}6$, $E = 2{,}11 \cdot 10^5$ МПа, $I = 12{,}8$ мм^4, $[f_{max}] = 0{,}0008$ мм, $V_k = 42$ м/с, $C_N = 0{,}14$, $l_3 = 1{,}2$ мм, $B_3 = 1{,}2$ мм, $d_3 = 3{,}61$ мм, $K_ш = 4{,}5$, $K_5 = 1$, $K_6 = 0{,}8$, $K_7 = 1{,}1$, $r = 0{,}8$, $y = 0{,}7$, $q = 0{,}2$, при шлифовании с применением масляной СОЖ, $K_7 = 0{,}88$, при шлифовании с применением водной СОЖ, $K_7 = 1{,}1$.

Ограничение 3. Связано с допустимым уровнем температуры шлифования Θ_{max}, влияющим на структурные и фазовые изменения в обрабатываемом материале, а в ряде случаев приводящим к возникновению прижогов и микротрещин

$$V_1^{(r-0,5)} \cdot S_2^{(x-0,25)} \leq \frac{\Theta_{кр} \cdot \lambda_M \cdot d_3^{(0,25-q)} \cdot (d_3 + D_K)^{0,25}}{943 \cdot a_M^{0,5} \cdot D_K^{0,25} \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot B_3^z}, \quad (7)$$

где $\Theta_{КР} = 724^{\circ}C$, $\lambda_M = 0{,}14$, $d_3 = 3{,}61$, $q = 0{,}2$, $D_k = 350$ мм, $a_M = 0{,}065$, $K_6 = 0{,}8$, $K_7 = 1{,}1$, $B_3 = 1{,}2$, $z = 1{,}2$, $r = 0{,}8$, $x = 0{,}55$, при шлифовании с применением водной СОЖ $K_5 = 1{,}3$, при шлифовании с применением масляной СОЖ $K_5 = 1$.

Таким образом, технические ограничения, представленные в виде системы неравенств (уравнения 4, 6, 7), образуют математическую модель шлифования. На рис.8,9 построены графическим методом математические модели.

Для поиска оптимальных решений необходимо дополнить систему уравнений целевой функцией, которая в нашем случае равна:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 \rightarrow max, \qquad (8)$$

где $x_1 = lnV_1$, $x_2 = lnS_2$.

Совместное решение системы уравнений (4, 6, 7) и целевой функции (8) позволило определить оптимальные режимы обработки: $V_{1опт}$, и $S_{1опт}$, произведение которых дает реальную производительность шлифования Q_p.

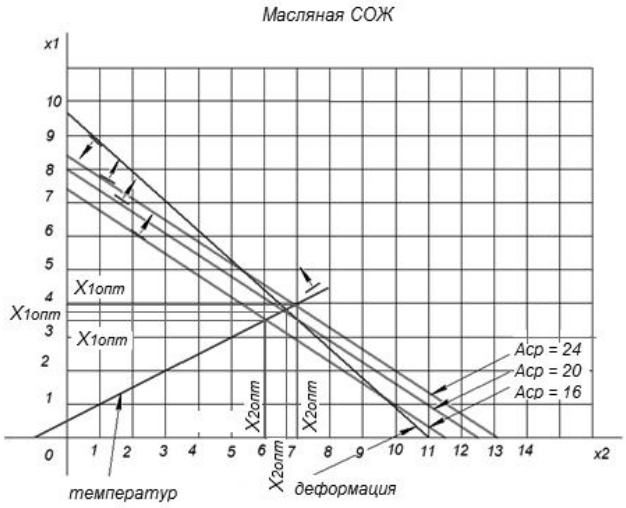


Рис.8. Модель оптимизации режимов шлифования с применением масляной СОЖ

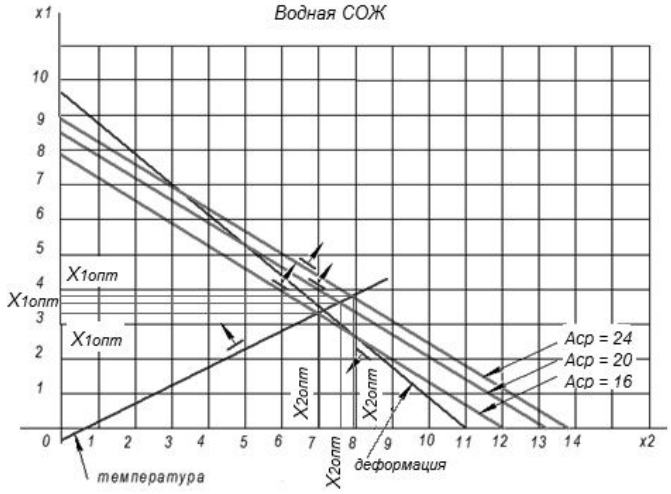


Рис.9. Модель оптимизации режимов шлифования с применением водной СОЖ

Исследования показали, что при шлифовании с водной СОЖ окружная скорость заготовки на 10 –15 % ниже, чем при шлифовании с масляной СОЖ, в тоже время врезная подача увеличилась в 2,4 – 2,6 раза. Таким образом, производительность операции шлифования увеличилась в диапазоне исследуемой шероховатости поверхности более чем в два раза. В табл. 2 приведены оптимальные режимы шлифования при обработке с двумя составами СОЖ.

Таблица 2

Оптимальные режимы шлифования

Вид СОЖ	Оптимальные режимы	При $A_{ср} = 16$	При $A_{ср} = 20$	При $A_{ср} = 24$
Масляная	$V_{1опт}$, м/мин,	33	40	49
	$S_{2опт}$,мм/мин	0,4	0,66	1,1
Водная	$V_{1опт}$, м/мин,	27	36	44
	$S_{2опт}$,мм/мин	1,09	1,8	2,6

В 6 главе приведены результаты опытно-промышленной проверки и внедрения разработанных технологий в производство.

Произведены расчеты экономической эффективности от применения водной СОЖ вместо масляной СОЖ на операции профильного шлифования дорожек качения колец приборных подшипников № 2000083S и техники очистки СОЖ от механических примесей.

Источниками экономической эффективности использования в промышленности результатов диссертационной работы являются:

– увеличение периода стойкости шлифовальных кругов и правящих инструментов;

– интенсификация режимов шлифования;

– снижение брака при обработке колец подшипников.

Общий годовой экономический эффект на 1 станок составил:

$$Э_о = Э_п + Э_к = 99840 + 116340 = 216180 \text{ руб.}$$

где $Э_п$ – общий годовой экономический эффект от повышения производительности труда на 1 станок при программе выпуска 120000 шт., $Э_к$ – экономический эффект от снижения брака при изготовлении колец.

Общие выводы по работе

1. Разработана конечно-элементная модель, которая позволяет исследовать процесс деформации колец подшипников при шлифовании дорожек качения. Установлено, что при шлифовании на величину деформации оказывают влияние режимы обработки и параметры наладки жестких опор, при доминирующем влиянии черновых режимов шлифования.

2. Разработана оригинальная методика оценки шероховатости поверхности оптико-электронным комплексом. Установлено, что наиболее информативным параметром микрогеометрии поверхности является амплитуда автокорреляционной функции. Предложены зависимости, связывающие параметры *Ra*, *Rz*, *Rmax* шероховатости поверхности и амплитуду автокорреляционной функции. Исследования показали, что предлагаемый метод оценки позволяет определить дефекты, полученные в результате шлифования. Установлено, что величина параметра шероховатости *Ra*, определяемая по амплитуде автокорреляционной функции, больше шероховатости профиля, измеренной контактным методом, на 15…20%.

3. Натурным исследованием установлено, что применение водной СОЖ стабилизирует отклонение от круглости и шероховатость поверхности, практически не изменяет значения высоты волнистости, снижает отклонение от профиля в осевом сечении с 2,1 мкм до 1,3 мкм, т.е. в 1,6 раза.

4. Установлено, что отклонение от круглости кольца подшипника при шлифовании на жестких опорах формируется под действием 3-х факторов: упругих деформаций кольца в процессе шлифования, отклонения от круглости базовой поверхности кольца подшипника и погрешности базирования кольца подшипника при установке на жесткие опоры.

5. Построена модель оптимизации процесса профильного шлифования с использованием опытно-экспериментального подхода, в которой обобщены и дополнены технические ограничения за счет использования амплитуды автокорреляционной функции поверхности дорожки качения, допустимого отклонения от круглости дорожки качения и температуры шлифования.

6. Наибольший экономический эффект от применения водной СОЖ достигается за счет снижения брака при обработке колец подшипников с 5 % до 1,5 %, интенсификации режимов обработки и соответствующего повышения производительности шлифования в 1,7 – 2,0 раза. Результаты экономических расчетов подтверждены опытно - промышленной проверкой и внедрением результатов исследований при изготовлении приборных подшипников на ООО «ЗПП» с общим экономическим эффектом 216180 руб.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в журналах из перечня ВАК

1. Носов Н. В.Исследование процесса шлифования дорожки качения приборных подшипников (часть 1) / Н.В. Носов, Р.Г. Гришин, В.А. Родионов, А.А. Широнин, О.В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд - во Самарского научного центра РАН. – Т.13. – № 4 (3). – 2011. – С. 1161 – 1164.

2. Родионов В.А. Исследование шероховатости дорожки качения приборного подшипника / В.А. Родионов, О.В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд - во Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т.18. – № 4 (2) – С. 373 – 377.

3. Родионова О.В. Оптимизация процесса профильного шлифования кольца подшипника / О.В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд - во Самарского научного центра РАН. – 2016. – Т.18. – № 4 (2). – С. 378 – 382.

Публикации в других научных изданиях

4. Носов Н.В. Моделирование деформаций, возникающих при шлифовании дорожки качения кольца приборного подшипника // Н.В. Носов, В.А. Родионов, О.В. Родионова // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2011. – С. 112 – 113.

5. Носов Н.В. Оптимизация режимов шлифования дорожек качения колец приборных подшипников / Н.В Носов., В.А. Родионов, А.А. Широнин, А.С. Голиков, О.В. Родионова // Высокие технологии в машиностроении. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2012. – С. 12 – 15.

6. Родионова О.В. Исследование остаточных напряжений, возникающих при шлифовании дорожки качения колец подшипников на жестких опорах / О.В.Родионова // Высокие технологии в машиностроении. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2012. – С. 145 – 148.

7. Родионова О.В. Моделирование процесса шлифования дорожки качения кольца подшипника на жестких опорах / О.В.Родионова // Современные компьютерные технологии фирмы «Delcam» в науке, образовании и производстве. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2013. – С. 96 – 100.

8. Родионов В.А. Исследование процесса шлифования приборных подшипников / В.А. Родионов, О.В.Родионова // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2013. – С. 52 – 55.

9. Родионова О.В. Исследование процесса формирования погрешности формы при шлифовании на жестких опорах / О.В.Родионова // Высокие технологии в машиностроении. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2013. – С. 58 – 61.

10. Родионова О.В. Исследование шероховатости приборного подшипника / О.В.Родионова // IX Всероссийская конференция-семинар с международным участием «Научно-техническое

творчество: проблемы и перспективы». – Самара, Самар. гос. техн. ун-т. – 2014. – С.98 – 102.
11. Родионова О.В. Моделирование процесса профильного шлифования / О.В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд - во Самарского научного центра РАН. Спец. вып. «Актуальные проблемы трибологии». –2015. – С. 122 – 125.
12. Родионов В.А. Исследование шероховатости поверхности сопряжения кольца приборного подшипника различными методами / В.А. Родионов, О.В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара: Изд - во Самарского научного центра РАН. Спец. вып. «Актуальные проблемы трибологии». – 2015. – С. 231 – 233.
13.Родионова О.В. Исследование шероховатости поверхности сопряжения подшипника / О.В.Родионова // Актуальные проблемы автотранспортного комплекса. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т. – 2015. – С. 26 – 30.
14. Носов Н.В. Оптимизация процесса шлифования колец подшипников на жестких опорах / Н.В. Носов, В.А. Родионов, О.В. Родионова // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: материалы докладов междунар. науч. – техн. конф. 22 – 24 июня 2016г. – Самара: Самарский университет. – В 2 Ч. – Ч.2. – 2016. – С. 167 – 168.

Родионова Ольга Владимировна

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАЦИИ ШЛИФОВАНИЯ НА ЖЕСТКИХ ОПОРАХ КОЛЕЦ ПРИБОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОНТРОЛЯ МИКРОГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета Д 999.003.02
ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет»
(протокол № 29 от 01.09. 2017г.)

Формат 6084 1/16 □
Подписано в печать «_____»_____2017 г.
Заказ №_____. Тираж _____экз.
ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244