

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

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**

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Носов Николай Васильевич
доктор технических наук, профессор

Самара – 2017

Содержание

Список основных аббревиатур и обозначений.....	5
Введение.....	9
Глава 1. Современные представления о путях повышения производительности, точности и качества обработки профиля поверхности колец приборных подшипников	14
1.1. Технологические особенности процесса бесцентрового шлифования колец подшипников на жестких опорах.....	15
1.2. Влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на производительность процесса.....	23
1.3. Современное представление о формировании геометриче- ских параметров поверхности при шлифовании.....	25
1.4. Связь геометрических параметров поверхности приборных подшипников с их надёжностью и долговечностью.....	30
1.5. Методы и средства измерения параметров микрогеометрии сложных поверхностей	33
1.6. Выводы. Цель и задачи исследований	35
Глава 2. Модель деформации кольца подшипника в процессе бесцентрового шлифования на жестких опорах.....	38
2.1. Создание модели и исходные данные.....	39
2.2. Расчет сил резания при профильном шлифовании.....	41
2.3. Моделирование процесса шлифования в программе ANSYS..	43
2.4. Результаты расчетов в программе ANSYS.....	47
Глава 3. Исследование микрогеометрии поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников оптико-электронным комплексом.....	54
3.1. Методика оценки микрогеометрии поверхности оптико-электронным комплексом.....	54

3.1.1.	Оптико-электронный комплекс и программное обеспечение	54
3.1.2.	Подготовка эталонных образцов.....	56
3.1.3.	Обработка видеоизображений и получение бинарных изображений поверхности.....	57
3.1.4.	Создание корреляционных поверхностей.....	58
3.1.5.	Построение бинарных корреляционных поверхностей и расчеты параметров корреляционной поверхности.....	60
3.2.	Идентификация геометрических параметров поверхности, полученных оптико-электронным методом.....	62
3.3.	Анализ дефектов при профильном шлифовании дорожек качения.....	69
Глава 4.	Исследование процесса бесцентрового профильного шлифования дорожек качения колец приборных подшипников на жестких опорах.....	75
4.1.	Методика проведения экспериментов.....	75
4.1.1.	Технические требования и технология обработки колец приборных подшипников на ООО «ЗПП».....	75
4.1.2.	Методика экспериментальных исследований производительности процесса.....	78
4.1.3.	Методика определения геометрических параметров дорожек качения колец подшипников.....	79
4.1.4.	Методика исследования качества СОЖ.....	81
4.2.	Исследование влияния СОЖ на качество поверхности дорожки качения колец приборных подшипников.....	86
Глава 5.	Оптимизация процесса бесцентрового профильного шлифования на жестких опорах.....	96
5.1.	Моделирование режимов бесцентрового профильного шлифования.....	98
5.2.	Расчет оптимальных режимов шлифования.....	101

Глава 6. Техничко-экономическая эффективность результатов исследований.....	105
6.1. Показатели эффективности процесса	105
6.2. Методика расчета экономической эффективности.....	110
Заключение.....	113
Библиографический список.....	115
Приложение 1.....	128
Приложение 2.....	130
Приложение 3.....	131
Приложение 4.....	132
Приложение 5.....	134
Приложение 6.....	135
Приложение 7.....	137

Список основных аббревиатур и обозначений

- A_{cp} – амплитуда автокорреляционной функции.
- A_{cpi} – амплитуда автокорреляционной функции при наличии дефекта.
- A_{cpj} – амплитуда автокорреляционной функции без дефекта.
- БЦОС – блок цифровой обработки сигнала.
- $K_{ш}$ – коэффициент шлифования.
- МКЭ – метод конечных элементов.
- M_{cp} – математическое ожидание автокорреляционной функции.
- O_u – центр вращения изделия.
- $O_{п}$ – центр опорной поверхности вращающейся планшайбы.
- ООО – общество с ограниченной ответственностью.
- СОЖ – смазочно-охлаждающая жидкость.
- СМ1 – степень твердости шлифовального круга.
- СМ2 – степень твердости шлифовального круга.
- T_k – стойкость круга, мин.
- T_{cp} – относительная опорная поверхность корреляционной функции, %.
- ТП – технологический процесс.
- ШК – шлифовальный круг.
- Φ_0 – световой поток, лм.
- $\mathcal{E}_{гэ}$ – годовой экономический эффект, руб.
- $\mathcal{E}_{гэ}$ – годовая экономия, руб.
- $\mathcal{E}_т$ – экономический эффект на одну деталь, руб.
- $\mathcal{E}_п$ – годовой экономический эффект от повышения производительности труда на 1 станок, руб.
- $\mathcal{E}_к$ – экономический эффект от снижения брака, руб.
- $\mathcal{E}_0$ – общий годовой экономический эффект на 1 станок, руб.
- ЭВМ – электроно - вычислительная машина.
- САЕ – системы – современные системы автоматизированного инженерного анализа.

A_n – коэффициент формообразования.

a_z – толщина срезаемого слоя, мм.

B – ширина круга, мм.

B_i – значение яркости центрального элемента окна.

b – ширина шлифования, мм.

b_z – ширина срезаемой стружки, мм.

B_{cp} – средний уровень яркости.

C_o – остаточная концентрация механических примесей в СОЖ, г/л.

d – диаметр заготовки, мм.

d_u – средний размер частиц механических примесей в СОЖ, мкм.

d_z – диаметр зерна, мм.

E – модуль упругости первого рода (модуль Юнга), МПа.

F – равнодействующая всех элементарных сил трения с учетом проскальзывания, Н.

$[f_{max}]$ – максимальный прогиб кольца, допускаемый отклонением от круглости дорожки качения, назначается техническими условиями обработки колец, мм.

F_n – площадь наплывов, мм².

$F_{стр}$ – площадь стружечной канавки, мм².

G – сила тяжести, Н.

h_m – максимальная высота наплывов (дефектов), мм.

h_n – высота элементарного режущего профиля, мм.

HV_m – твердость материала по Виккерсу.

HV_{max} – максимально достижимая твердость материала по Виккерсу.

K_i – величина относительной значимости дефектов, %.

l – величина смещения центров, мм.

$N_э$ – мощность шлифования, Вт.

$n_з$ – число оборотов заготовки, об/мин.

n_k – число оборотов ШК, об/мин.

P – сила шлифования, Н.

P_y – радиальная сила шлифования, Н.

P_z – касательная сила шлифования, Н.

Q – сила прижима, Н.

Ra – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм.

$Rmax$ – наибольшая высота неровностей профиля, мкм.

Rp – высота наибольшего выступа профиля, мкм.

Rz – высота неровностей профиля по десяти точкам, мкм.

Rz_l – величина шероховатости, полученная при шлифовании без продольной подачи, мкм.

Rz_d – глубины дефекта, мкм.

S_l – продольная подача в долях ширины круга на 1 оборот заготовки, мм/об.

S_2 – поперечная подача, мм/мин.

$S_{черн}$, $S_{чист}$ – врезная подача при ченовых и чистовых режимах обработки соответственно, мм/мин.

$t_{черн}$, $t_{чист}$ – глубина резания при черновых и чистовых режимах шлифования соответственно, мм

$T_{м\ черн}$, $T_{м\ чист}$ – время обработки при черновых и чистовых режимах шлифования соответственно, с.

V_3 , $V_{3черн}$, $V_{3чист}$ – окружная скорость заготовки, скорость заготовки при черновых режимах шлифования, скорость заготовки при чистовых режимах шлифования соответственно, мм/мин.

V_k – окружная скорость ШК, м/сек.

3D – 3 – dimensional (трехмерное пространство).

Δ_b – волнистость, мкм.

Δ_r – гранность, мкм.

Δ_k – отклонение о круглости, мкм.

Δ'_k – деформация кольца, мкм.

Δ_{Π} – отклонение от профиля, мкм.

$\Delta y, \Delta z$ – координаты смещения центра изделия относительно центра планшайбы по осям y и z соответственно, мм.

ε – степень очистки позволяющая оценить относительное удаление частиц механических примесей из СОЖ.

ε_n – коэффициент выдавливания.

$\varepsilon_{n.o.}$ – коэффициент выдавливания при низких скоростях резания.

Θ – температура шлифования, °С.

λ – угол приложения силы Q , °.

μ – коэффициент трения.

ρ – плотность, кг/м³.

σ – среднеквадратическое отклонение амплитуды автокорреляционной функции.

ω_n – угловая скорость планшайбы, рад/с.

Введение

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 дорожек качения внутренних колец приборных подшипников на жестких опорах применяется на заключительном этапе технологического процесса благодаря своей высокой производительности, технологической надежности и возможности полной автоматизации.

Большое влияние на технологическую надежность приборных подшипников оказывает сохранение в заданных пределах значений таких геометрических параметров дорожки качения колец, как отклонение от круглости, гранность, волнистость и отклонение от профиля, а также параметров микрогеометрии поверхности (шероховатость в продольном и поперечном направлениях) и дефекты на рабочей поверхности.

Повышение точности и качества поверхностей колец подшипников сопровождается неуклонным ужесточением требований к достоверности результатов их измерения, к точности измерительных приборов и методам обработки данных. Анализ технологического процесса изготовления внутренних колец приборных подшипников показал, что на поверхности дорожек качения в результате процесса шлифования на жестких опорах появляются дефекты, количество которых зависит от режимов и условий обработки. Установлено, что дефекты, которые образуются в процессе шлифования дорожек качения на операции контроля не фиксируются контрольными приборами, а на последующих технологических операциях (суперфиниширование и полирование) не выводятся, поэтому часть колец после изготовления бра-

куются. По литературным данным в подшипниках качения была экспериментально подтверждена прямая зависимость уровня шума и вибраций от наличия дефектов на рабочей поверхности. Установлено, что в большинстве случаев износ трущихся поверхностей подшипников при трении имеет усталостный характер разрушения поверхностного слоя под влиянием повторных термомеханических воздействий, которые зарождаются в местах образования дефектов на поверхности дорожек качения колец подшипников.

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, характеристик шлифовальных кругов, изменяющейся силовой, динамической и температурной ситуации в процессе шлифования.

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

Решение данной проблемы выдвигает и ряд требований, которым должны удовлетворять современные мобильные средства получения измерительной информации о геометрических параметрах микрорельефа исследуемой поверхности в зависимости от заданной точности, производительности и степени автоматизации контроля. Эти измерительные средства должны быть малогабаритными, реализовывать бесконтактный способ получения измерительной информации непосредственно в производственных условиях и в реальном масштабе времени, обеспечивать цифровую обработку получаемой информации и иметь возможность оценивать микрорельеф поверхностей, имеющих сложные формы, такие как внутренние и наружные поверхности дорожек качения колец подшипников. В связи с этим разработка современных методов и средств, обеспечивающих оперативное измерение параметров

микрорельефа механически обработанных поверхностей колец приборных подшипников непосредственно в ходе выполнения окончательных операций технологических процессов, а также при дальнейшей эксплуатации подшипников, является важной производственной задачей.

По результатам проведенных аналитических исследований можно выделить следующие основные технологические проблемы, составляющие научную новизну работы (см. рис.1.1).

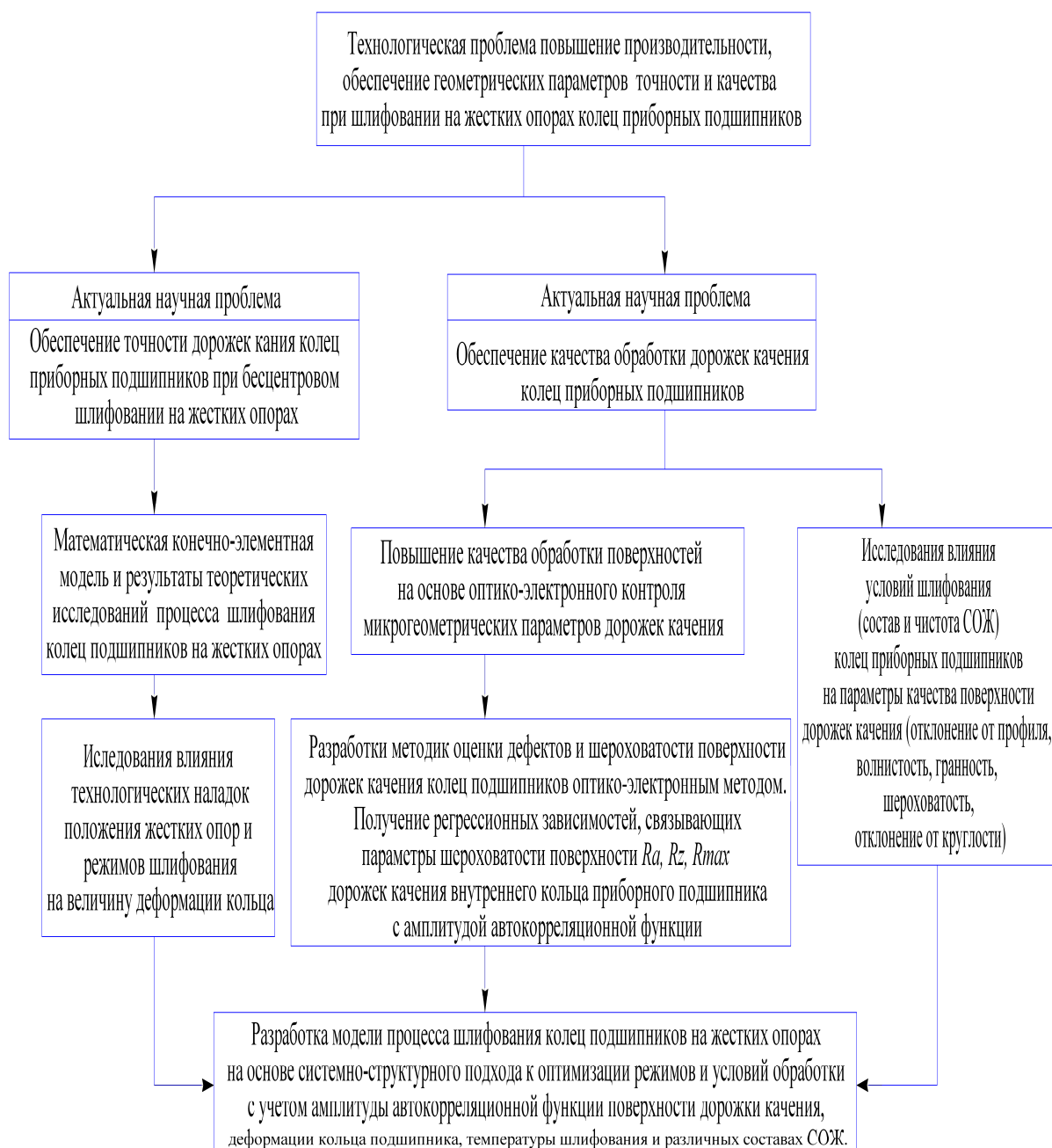


Рис.1.1. Структурная схема реализации задач исследования

Общий годовой экономический эффект при шлифовании профиля дорожки качения внутренних колец приборных подшипников на ООО «ЗПП» от применения водных СОЖ составил 216180 руб., который получен за счет увеличения периода правки шлифовальных кругов и износа правящих инструментов; интенсификации режимов шлифования и уменьшение машинного и штучного времени; повышения производительности шлифования в 1,7 – 2,0 раза, снижения брака при обработке.

В работе применялись современные методы исследований, базирующиеся 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 внутренних колец приборных подшипников, качество поверхности исследовалось в измерительных лабораториях ООО «Завод приборных подшипников» г. Самара с использованием аттестованных измерительных средств, а также с применением оптико-электронного комплекса и методов регрессионного и дисперсионного анализов.

Достоверность результатов подтверждается корректным сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований и применением современных методик и оборудования.

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.).

Диссертационная работа содержит в себе решение актуальной научно-технической задачи – повышение производительности шлифования на жестких опорах колец приборных подшипников на основе оптико-электронного контроля геометрических параметров дорожек качения. Содержание исследований соответствует специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки». Область 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).

Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и рекомендаций, списка использованной литературы из 125 наименований и 7 приложений, изложена на 137 страницах, содержит 10 таблиц, 53 рисунка.

Глава 1. Современные представления о путях повышения производительности, точности и качества обработки профиля поверхности колец приборных подшипников

В настоящее время разработано большое количество технологических методов достижения требуемых геометрических параметров поверхностей при шлифовании дорожек качения колец подшипников [22, 23, 35, 38, 53, 69, 587, 103, 105 и др.]. Операции шлифования, суперфиниширования и полирования дорожки качения колец подшипников являются заключительными и именно на этих операциях формируются геометрические параметры точности и качества, определяющие надёжность и долговечность работы подшипников [11, 37, 47]. Разнообразие и сложность операций шлифования колец на жестких опорах, большое число переменных параметров создают определенные трудности в выборе методов повышения производительности шлифования [1, 25, 30, 31, 65, 89, 95, 98, 104, 106, 113 – 119, 125 и др.].

Известно, что при шлифовании подшипниковых стале́й с увеличением производительности обработки уменьшается стойкость шлифовальных кругов (ШК) и существенно ухудшается качество обработанной поверхности [7, 33, 46, 54, 107 и др.]. Основными недостатками процесса профильного шлифования ШК являются: низкое качество абразивного инструмента [29, 41, 67], нестабильность геометрии рабочей поверхности круга [8, 76], не оптимальное применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) [13, 73, 88], в результате износа ШК увеличивается силовая и тепловая напряженность в зоне резания [54, 98], снижение качества поверхностного слоя за счет появления прижогов и микротрещин [92], нестабильность микрогеометрических параметров поверхности после шлифования [105], снижение долговечности работы подшипников [11, 84] и др.

Процесс бесцентрового шлифования дорожки качения внутренних колец подшипников осуществляется на предприятии методом врезания на жестких опорах. Выбор этого метода шлифования обусловлен высокими требо-

ваниями по производительности и точности обработки колец приборных подшипников [38]. Производительность, точность и качество приборных подшипников на операции шлифования дорожек качения колец на жестких опорах зависит от марки обрабатываемого материала и его термообработки; геометрических размеров и сложности формы обрабатываемой поверхности, требуемой точности и качества поверхности дорожек качения подшипников, программы выпуска подшипников, последовательности технологических операций и переходов, состояния и технологических возможностей оборудования, правильно выбранных режимов и условий обработки и т.д.

1.1. Технологические особенности процесса бесцентрового шлифования колец подшипников на жестких опорах

Технологический процесс бесцентрового шлифования дорожек качения внутренних колец приборных подшипников на жестких опорах является наиболее распространенным в подшипниковой промышленности. Основной особенностью метода бесцентрового шлифования колец подшипников на жестких опорах является замена ведущего круга неподвижной опорой, при этом вторая опора является регулируемой. Преимущество данного метода связано с тем, что вращение заготовки не зависит от биения оси шпинделя и влияния упругих колебаний системы. Благодаря этому обработка дорожки качения колец на жестких опорах обеспечивает снижение погрешности таких геометрических параметров, как гранность, волнистость, отклонение от круглости [17, 20, 25, 69].

При бесцентровом профильном шлифовании дорожки качения колец подшипников на жестких опорах базой является цилиндрическая поверхность кольца. Цилиндрическая поверхность опирается на две жесткие опоры, и непрерывность этого контакта в процессе шлифования поддерживается автоматически. Кольцо подшипника к жестким опорам прижимается электромагнитными силами плотностью 400 – 700 МПа в результате смещения цен-

тра вращения детали относительно оси планшайбы. Процесс обработки осуществляется при постоянной подаче СОЖ в зону шлифования.

Теоретический анализ процесса шлифования колец подшипников на жестких опорах был произведен в работах [14, 21 – 24, 38, 97]. И. П. Кузнецов [38] при шлифовании дорожки качения внутренних колец подшипников предложил расчет равнодействующей всех элементарных сил трения с учетом проскальзывания, прижимающей кольцо подшипника к жестким опорам (см. рис.1.2). Из условий равенства равнодействующих сил трения, автор предлагает определять величину силы трения F с достаточной для практики точностью по формуле:

$$F = Q \cdot \mu \left(1 - \frac{1}{2,6\beta^2 + 1} \right), \quad (1.1)$$

где Q – сила прижима; μ – коэффициент трения между торцевой поверхностью кольца и планшайбой; β – коэффициент; определяемый по формуле: $\beta = \frac{\omega_n \cdot l}{r_n \cdot \Delta \omega_n}$; где ω_n – угловая скорость планшайбы; l – смещение центров: $l = \sqrt{\Delta y^2 + \Delta z^2}$; где Δy и Δz – координаты смещения центров кольца и планшайбы относительно осей; $\Delta \omega_n$ – угловое относительное скольжение.

На основе расчета данной силы F автор [38] дает практические рекомендации по наладке положения жестких опор, которые составляют: $\alpha = 10 - 25^\circ$, $\beta = 110 - 120^\circ$, $\gamma = 45 - 50^\circ$, а также большое значение уделяет нахождению силы прижима в зависимости от эксцентриситета и коэффициентов трения между кольцом и жесткими опорами.

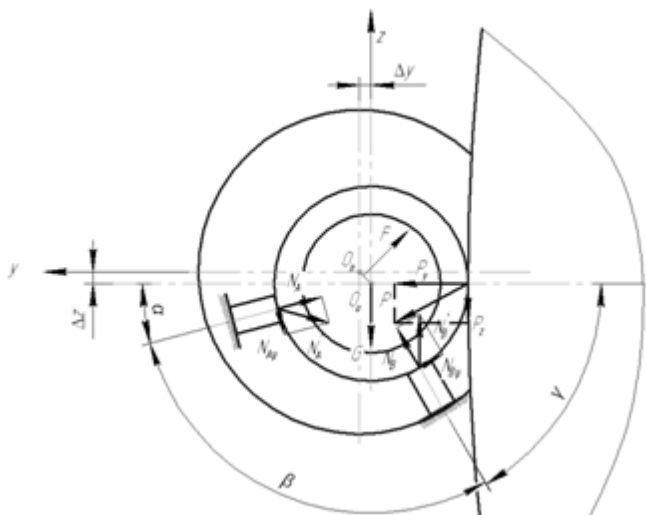


Рис.1.2. Принципиальная схема, приложенных сил на кольцо при бесцентровом шлифовании на жестких опорах [38]: P – равнодействующая сила; P_z – касатель-

ная сила; P_y – радиальная сила, $N_A\mu$, $N_B\mu$ – силы трения между жесткими опорами и кольцом подшипника (μ – коэффициент трения); N_A , N_B – силы реакции в опорах; G – сила тяжести; F – равнодействующая сил трения; O_u – центр вращения кольца; O_n – центр вращения планшайбы; Δy , Δz – смещения центра кольца относительно центра планшайбы по осям y и z ; α – угол, определяющий положение регулируемой опоры; β – угол между опорами; γ – угол определяющий направление равнодействующей силы.

В своих работах В. П. Филькин и И. Б. Колтунов [97] установили, что при бесцентровом шлифовании на жестких опорах контур обрабатываемого кольца находится в постоянном контакте с базирующими элементами и шлифовальным кругом. Поэтому при настройке процесса шлифования на жестких опорах авторы большое внимание уделяли обеспечению стабильного положения кольца подшипника относительно рабочей поверхности шлифовального круга. Авторы предложили схему расположения сил, действующих на кольцо подшипника в процессе наружного бесцентрового шлифования на жестких опорах (см. рис.1.3) и определили критический угол действия силы $\lambda_{кр}$.

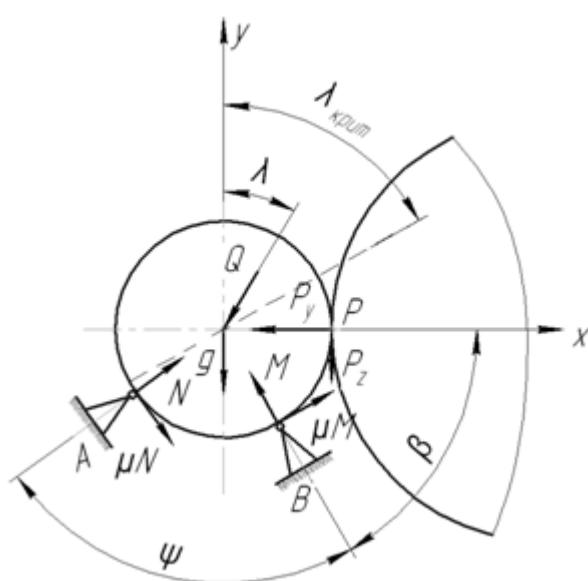


Рис.1.3. Силы, действующие при бесцентровом шлифовании на жестких опорах [97]: P – точка контакта детали с шлифовальным кругом; P_y – нормальная сила; P_z – сила шлифования, $P_z = k_p P_y$, k_p – коэффициент резания; N и μN – нормальная реакции и сила трения на опоре А; M и μM – нормальная реакции и сила трения на опоре В; g – сила веса;

Q – сила поджима, вызываемая смещением оси вращения детали по отношению к оси вращения планшайбы, которая направлена по отношению к оси Y

под некоторым углом λ ; ось X направлена из мгновенного центра вращения детали через точку шлифования P ; угол ψ – центральный угол между направлениями реакций N и M на опорах A и B соответственно; угол β – центральный угол между реакциями в точках B и P .

Авторы [97] рассматривали равновесие сил в среднем сечении детали. По общим положениям статики было принято, что тело находится в равновесии, если сумма проекции сил на оси координат равна нулю и сумма моментов сил относительно мгновенного центра вращения равна нулю:

$$\left. \begin{aligned} -Q \sin \lambda - P_y - M \cos \beta + \mu M \sin \beta - N \cos(\psi + \beta) + \\ + \mu N \sin(\psi + \beta) = 0; \\ -Q \cos \lambda - k_p P_y + M \sin \beta + \mu M \cos \beta + N \sin(\psi + \beta) - \\ - \mu N \cos(\psi + \beta) - g = 0; \end{aligned} \right\} (1.2)$$

Авторы установили, что необходимым условием бесцентрового шлифования на жестких опорах является отсутствие отрыва детали от опор A и B , и считают наиболее возможным отрыв в точке B . Возникновение такого отрыва, они связывают с несколькими факторами: изменение направления суммарной реакции в точке P , вызванное затуплением ШК, и изменение величины и направления эксцентриситета, вызванные допускаемыми колебаниями припуска под обработку и геометрическими погрешностями формы заготовки. Из условия отрыва в точке B , т.е. $M = 0$, авторы рассчитывают максимальное значение $\lambda_{\text{крит}}$:

$$\cos \lambda_{\text{крит}} [Q \cos \beta - Q \mu \sin \beta] D + \sin \lambda_{\text{крит}} \cdot [(Q \sin \beta + \mu \cos \beta) D + Q C] = DV - P_y C, \quad (1.3)$$

тогда
$$\cos(\lambda_{\text{крит}} - \delta) = \frac{(DV - P_y C) \cos \delta}{(\cos \beta - \mu \sin \beta) Q D}, \quad (1.4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(\sin \beta + \mu \cos \beta) + \frac{C}{D}}{\cos \beta - \mu \sin \beta}. \quad (1.5)$$

По полученным формулам (1.3) и (1.4) авторы рекомендовали для достижения стабильного радиального прижима детали к опорам и высокого качества обрабатываемой поверхности иметь угол λ в пределах $40 - 50^\circ$.

В своей работе В. П. Филькин и И. Б. Колтунов [97] отмечали, что основное влияние на процесс формообразования геометрических параметров поверхностей внутренних колец подшипников при бесцентровом шлифовании на жестких опорах оказывает коэффициент формообразования A_n , зависящий от параметров наладки станка углов ψ и β .

$$A_n = 1 - \frac{\sin(\beta + \psi)}{\sin \psi} \cos n\beta + \frac{\sin \beta}{\sin \psi} \cos n(\beta + \psi) \quad (1.6)$$

Анализ данной формулы и практические исследования процесса бесцентрового шлифования позволили автором сделать вывод, что удовлетворительное формообразование можно получить при $\psi = 100 - 135^\circ$, а $\beta = 35 - 60^\circ$.

Рекомендации, приведенные в работе [97] по созданию рациональных условий процесса бесцентрового шлифования внутренних колец подшипников на жестких опорах предложены в зависимости от расчетной силы прижима Q и коэффициента формообразования A_n . Предложенные авторами наладки имеют большой разброс и требуют дальнейших исследований.

Изучением метода бесцентрового шлифования колец подшипников с базированием по дорожке качения на двух неподвижных опорах занимались в своих работах Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров [22, 23]. Авторы установили, что наибольшее влияние на точность и качество поверхности дорожек качения при шлифовании оказывают силовые и тепловые деформации и неточность установки колец подшипников на жесткие опоры.

В своих работах Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров [22] отмечали следующие особенности бесцентрового шлифования дорожек качения колец подшипников:

1. Снижение влияния погрешности вращения планшайбы;
2. Отсутствие деформаций кольца от сил закрепления;

3. Копирование погрешности базовых поверхностей кольца на дорожку качения;

4. Обеспечение точности дорожек качения колец в зависимости от геометрических и кинематических связей;

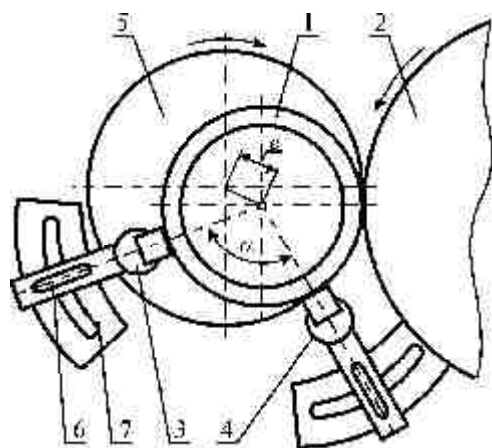


Рис.1.4. Применение неподвижных опор при бесцентровом шлифовании [22]: 1 – заготовка; 2 – шлифовальный круг; 3,4 – опоры; 5 – планшайба; 6,7 – каретки; α – угол между опорами

Кольцо подшипника устанавливается на две опоры 3 и 4, под углом α (см. рис.1.4). Перемещение опор относительно планшайбы 5 осуществляется за счет кареток 6 и 7. Авторы [22] предлагают схему силового взаимодействия при бесцентровом шлифовании на неподвижных опорах с базированием кольца подшипника по желобу (рис.1.5).

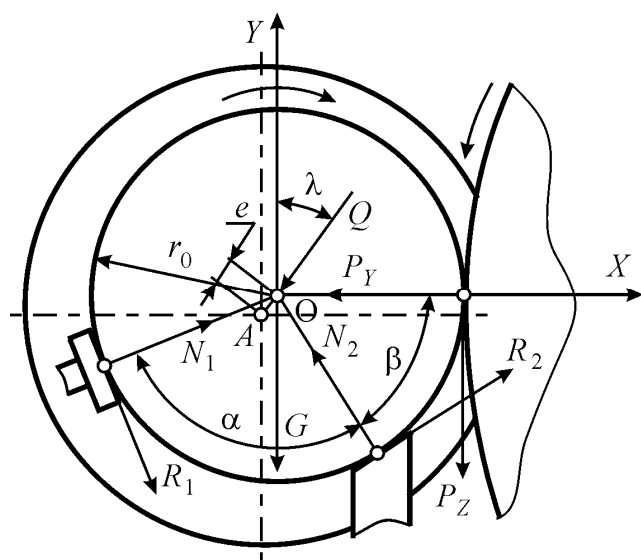


Рис.1.5. Силы, возникающие при шлифовании колец подшипников на неподвижных опорах [22]: α – угол между неподвижными опорами; β – угол, определяющий положение регулируемой опоры; λ – угол приложения сила прижима кольца Q ; N_1 , N_2 – силы реакции опор; R_1 , R_2 – силы трения кольца

об опоры.

Выразив силы трения через силы нормальной реакции и коэффициенты трения на неподвижных опорах, авторы получили следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} N_1 [f \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)] + N_2 [f \sin(\beta) - \cos(\beta)] &= \\ &= P_y + Q \sin(\lambda); \\ N_1 [f \sin(\alpha + \beta) + f \cos(\alpha + \beta)] + N_2 [\sin(\beta) + f \cos(\beta)] &= \\ &= kP_y + G + Q \cos(\lambda); \\ f(N_1 + N_2) &= kP_y. \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Преобразовав систему уравнений (1.7) авторы определили условие равенства нулю суммарного момента от сил трения на опорах и силы резания:

$$\begin{aligned} &[f \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta)] [f(G + Q \cos(\lambda)) + kP_y(f - a)] - \\ &- [\sin(\alpha + \beta) + f \cos(\alpha + \beta)] \cdot [fQ \sin(\lambda) + P_y(f - kb)] + \\ &+ af(P_y + Q \sin(\lambda)) - -bf(kP_y + G + Q \cos(\lambda)) = P_y + Q \sin(\lambda), \end{aligned} \quad (1.8)$$

Для обеспечения стабильного прижима кольца к обоим опорам (уравнение 1.8), необходимо приравнять силы реакций на опорах $N_1 = N_2$ (уравнение 1.9):

$$\begin{aligned} &(kP_y + G + Q \cos(\lambda))(f \sin(\alpha + \beta) - \cos(\alpha + \beta) + a \sin(\alpha) - \cos(\beta)) - \\ &- (P_y + Q \sin(\lambda)) \times \\ &\times (\sin(\alpha + \beta) + f \cos(\alpha + \beta) + \sin(\beta) + f \cos(\beta)) = 0. \end{aligned} \quad (1.9)$$

В данные уравнения (1.8) и (1.9) включены, как наладочные углы α , β и λ , так и силы P_y , G , Q .

Таким образом, авторы предлагают для оптимизации силовых параметров процесса бесцентрового шлифования колец подшипников на неподвижных опорах использовать следующие величины: направление силы прижима Q , нормальную силу при шлифовании P_y , угол α между неподвижными опорами, угол β , определяющий положение регулируемой опоры. Сила Q обеспечивает стабильный прижим кольца к опорам, а угол λ изменяется в пределах $\pm 45^\circ$.

Авторы предложили модель формообразование геометрических параметров поперечного сечения кольца подшипника Δ_1 , Δ_2 при базировании по наружной поверхности (см. рис. 1.6).

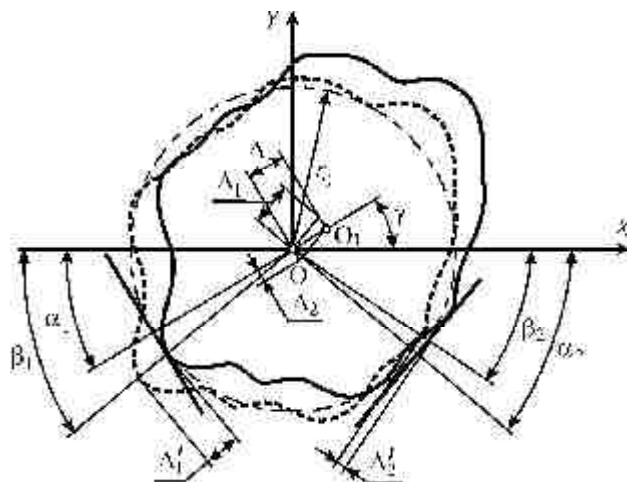


Рис.1.6. Расположение опорных точек при шлифовании колец подшипников на жестких опорах

Проведенные авторами расчеты и эксперименты позволили сделать следующие выводы:

1. Оптимальная наладка углов жестких опор при шлифовании колец подшипников позволяет уменьшить погрешность базирования;
2. Отклонениями от нерациональной наладки жестких опор следует считать овальную и трехгранную форму поверхности центра кольца;
3. Углы наладки неподвижных жестких опор при минимальной погрешности базирования составляют $80 - 110^\circ$.

Как мы видим из проведенного анализа вопросы выбора силы прижима по торцу, установки углов опор для стабильного прижима заготовки и наилучшего исправления отклонений поперечного сечения в частных случаях исследовались в работах [22, 23, 38, 97]. На сегодняшний день применение метода бесцентрового шлифования на жестких опорах колец подшипников показало, что зачастую сложно добиться стабильности процесса шлифования и обеспечить требуемые геометрические параметры точности и качества обработки в поперечном и продольном сечении, в связи с этим являются акту-

альными дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования данного процесса.

1.2. Влияние режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на производительность процесса

В настоящее время проведен большой комплекс исследований по влиянию режимов шлифования и характеристик абразивного инструмента на производительность процесса [43, 45, 46, 48, 50, 60, 68, 83, 84, 92, 99, 106, 109, 112 и др.]. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по повышению производительности процесса, снижению себестоимости обработки и обеспечению требуемых параметров точности и качества при шлифовании колец подшипников.

При исследованиях применялись абразивные круги формы 1. В процессе работы ШК периодически правят [1, 16, 28, 32, 66, 44, 70]. Процесс шлифования дорожек качения колец подшипников имеет два принципиальных решения: шлифовальный круг правится после обработки одной заготовки (принудительная правка), или шлифовальный круг работает в режиме самозатачивания и правится периодически, за период стойкости.

В процессе шлифования период стойкости ШК определяется по ряду критериев:

1. Обеспечение заданной точности размеров и расположения [47];
2. Снижение параметров микрогеометрии поверхности [76];
3. Обеспечение бесприжогового шлифования [84];
4. Снижение производительности процесса, появление шума и вибраций при обработке [91].

Наиболее существенными факторами, влияющими на момент затупления ШК, являются марка обрабатываемого материала [2, 47], режимы шлифования [94, 104, 106], характеристики кругов [49, 83, 86, 95].

В процессе износа ШК происходит истирание абразивных зёрен, их выкрашивание и засаливание порового пространства и др. [48, 66, 72]. Отходы после правки (осколки зерен и связки) попадают в СОЖ, поэтому важной задачей любого процесса шлифования является разработка технологии применения и очистки СОЖ, которая подробно разработана в работах [12, 13, 15, 39, 40, 73, 88, 99, 110 – 112 и др.].

Процесс износа ШК при больших подачах связан с явлениями засаливания рабочей поверхности отходами шлифования [98]. Исследованиями [61] установлено, что с увеличением твердости круга стойкость кругов между правками повышается, в тоже время наблюдается появление прижогов на обрабатываемых поверхностях. Оптимальным, с этой точки зрения, при шлифовании подшипниковых сталей является применение кругов твердостью СМ2...СМ1 с пористостью 37,5 – 40,5 % [76].

Таким образом, можно сделать вывод, что с увеличением твердости кругов ухудшается обрабатываемость подшипниковых сталей.

Исследованиями [54] установлена вероятность возникновения прижогов на поверхности заготовки при профильном шлифовании на предельных подачах врезания. Исследования также показали, что с увеличением твердости круга и врезной подачи вероятность появления прижогов повышается до 5 – 8 %. При этом изменялся и характер прижога, который переходил от штрихового к сплошному. Для сохранения баланса пористости и твердости при шлифовании автор предлагает:

1. Перейти на работу ШК с повышенным содержанием пор до 45 %;
2. Изменить марку технологической жидкости;
3. Изменить режимы правки в сторону увеличения продольной подачи или уменьшения радиуса вершины алмазного зерна.

При работе с радиальной подачей стойкость круга T_K определяется по формуле [62]:

$$T_K^{m_T} = \frac{c_T \cdot d_3^{\rho_T}}{V_1^{0,8} \cdot S_2^{Y_T} \cdot B_3^{x_T}}, \quad (1.10)$$

где V_1 – скорость вращения заготовки (м/мин); S_2 – поперечная подача (мм/мин); B_3 – ширина шлифования (мм); d_3 – диаметр зерна (мм); C_m и u_m , x_m , ρ_m – коэффициент и показатели степени.

Для снижения температуры в зоне резания в работах [13, 15] предлагается использовать современные СОЖ и способы их подачи в зону обработки. Срезаемая стружка размещается в порах ШК и определяет условия схватывания стружки с рабочей поверхностью ШК (явление засаливания). В том случае, если стружка силами трения удерживается в порах круга и не удаляется центробежными силами, и не вымывается смазочно-охлаждающей жидкостью, она при следующем обороте вступает в контакт с обрабатываемой поверхностью и может приводить к появлению дефектов, особенно при чистовом шлифовании [98]. При этом наступает, так называемый, процесс пакетирования, который может привести к уменьшению порового пространства практически до нуля. Основными причинами засаливания ШК являются неправильный выбор характеристик инструмента, режимов обработки, некачественная очистка СОЖ. Поэтому важную роль при шлифовании выполняют разработка системы очистки СОЖ и оптимизация ее характеристик [13, 99, 100].

1.3. Современное представление о формировании геометрических параметров поверхности при шлифовании

Оценка геометрических параметров поверхности в процессе шлифования дорожки качения колец подшипников (шероховатость, волнистость, гранность, отклонение формы, отклонение профиля и др. параметры) в известной степени зависят от полноты и глубины обобщения теоретического и экспериментального материала, накопленного в этой области. Существует множество литературных источников [16, 17, 25, 30, 31, 37, 46, 50 – 52, 66, 77, 85, 93, 108, 115, 123 и др.], в которых приведены данные о влиянии характеристик ШК, кинематики и динамики процесса шлифования и физико-

механических свойств обрабатываемого материала на геометрические параметры точности и качества обрабатываемой поверхности.

В трудах Л. Н. Филимонова и Н. В. Носова и др. [54, 62, 63, 94] большое внимание уделяется вопросам формирования микрогеометрии обработанной поверхности. Авторы предлагают определять высоту микрорельефа Rz , учитывая образование наплывов и дефектов при пластической деформации:

$$Rz = h_{эф} + h_n = h_n \cdot t^{-\alpha n} + h_m \cdot a_z^v \cdot V^{-\delta}, \quad (1.11)$$

где h_n – высота элементарного режущего профиля, определяемая по профилограмме поверхности круга; n – число наложений в продольном и поперечном направлении; h_m – максимальная высота наплывов (дефектов); α – показатель степени (декремент затухания); a_z – толщина срезаемого слоя; δ и v – показатели степени.

Авторы определяли влияние пластической деформации металла на высоту микрорельефа в зависимости от марки обрабатываемого материала, радиуса округления вершин зёрен и толщины срезаемого слоя. Установлено, что в зависимости от режимов шлифования работа пластической деформации увеличивается на 90 – 95 % [95], что ведет к большей вероятности образования дефектов. Возможен и более простой подход к оценке высоты микрорельефа обработанной поверхностью $Rz = C_z \cdot a_z + h_n$, где C_z – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, образование наплывов и связанных с ними дефектов при шлифовании за счет работы деформирующих зёрен неизбежно. Для определения максимальной высоты наплывов произведено сравнение площади стружечной канавки $F_{стр}$ и площади наплывов F_n .

Приравняв площади $F_{стр} \approx F_n$, была выражена максимальная высота наплыва (дефекта):

$$h_{nmax} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \cdot a_z \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_3 \cdot a_z}}. \quad (1.12)$$

Расчеты показывают, что $h_{\text{нmax}}$ всегда больше a_z . Так, например, при $a_z = 0,002$ мм и $\rho_3 = 0,02$ мм, $h_{\text{нmax}} = 0,0067$ мм, тогда высота микронеровностей $Rz = 0,002 + 0,0067 = 0,0087$ мм [43].

Таким образом, с учетом образования наплывов при шлифовании высоту микрорельефа Rz автор [62] предлагает рассчитывать по следующей формуле $Rz = a_z + h_{\text{нmax}} (\epsilon_{\text{н.о.}} - C_{\text{н}} \cdot V_k)$.

Толщина срезаемого единичным зерном слоя a_z определялась многими исследователями [1, 43, 46, 68, и др.]. Г.Б. Лурье [43] при расчете учитывал связь производительности Q_y с толщиной срезаемого слоя:

$$a_z \approx 33 \sqrt{\frac{Q_y}{N_t \cdot V_k}} \cdot \sqrt[4]{\frac{D_k + d_d}{D_k \cdot d_d \cdot \rho_3}}, \quad (1.13)$$

где Q_y – производительность процесса ($\frac{\text{мм}^3}{\text{мм} \cdot \text{мин}}$); D_k и d_d – соответственно диаметр ШК и заготовки (мм); ρ_3 – радиус зерна (мм); N_t – количество режущих кромок на рабочей поверхности ШК (мм^{-1}).

Для расчета величины a_z по приведенной формуле необходимо знать величину N_t , которая, в свою очередь, зависит от уровня разрезки t_k . Как правило, величиной t_k задаются при известном законе распределения N_t по высоте круга. Величину N_t определяют экспериментально, $t_k = 0,1 \dots 0,2$ [43].

В. И. Островский [68] определяет a_z через распределение расстояний между зёрнами ШК в окружном δ и радиальном H направлениях, что, на наш взгляд, является более правильным:

$$a_z = \frac{V_1}{V_k} \left[\delta \left(2 \frac{y_0}{L_k} - \frac{V_1 \cdot \delta \cdot y_0}{V_k \cdot L_k^2} \right) \pm H \right], \quad (1.14)$$

где L_k – длина дуги контакта; y_0 – фактическая глубина резания; V_1 – скорость вращения детали.

Аналогичная формула предложена Е. Н. Масловым [46] для расчета величины $a_{z \text{ max}}$.

Автором [43] получена эмпирическая зависимость по определению величины a_z для продольного сечения среза в виде запятой – $a_z = 2 \cdot S_z \cdot \sqrt{t/D}$.

Показано, что величина a_z зависит также от формы стружки, рассматривались 3 варианта моделей формы стружки:

$$\text{треугольная пирамида } a_z = 2,08 \cdot \sqrt[3]{S_z^2 \cdot t^2 / D};$$

$$\text{призма } a_z = \sqrt[3]{S_z^2 \cdot t^2 / D};$$

$$\text{и четырехугольная пирамида } a_z = 1,31 \cdot \sqrt[3]{S_z^2 \cdot t^2 / D}.$$

Сравнение расчетов, по приведенным формулам, показывает значительный разброс величины a_z . Анализ схем стружкообразования и экспериментальные замеры a_z позволили автору рекомендовать, в качестве наиболее близкого к фактической форме среза, расчеты по формуле для треугольной пирамиды.

Согласно анализу, проведенному А. В. Якимовым [106], коэффициент шлифования колеблется от 2,6 до 2,2, что подтверждается результатами экспериментальных исследований других авторов ($K_{ш} = 1,7 \dots 3$) [32].

Найдем величину a_z через относительную критическую глубину внедрения зерен из формулы, предложенной [62]:

$$a_z = \frac{\rho^{0,7} \cdot t}{0,023 \cdot V_k^{0,53} (1 - \sin \gamma_k)}, \quad (1.15)$$

где t – глубина резания при шлифовании с поперечной подачей ($t = \frac{S_r}{n}$); $\gamma_k = (-60^\circ) \dots (-80^\circ)$.

Предложенной методикой можно пользоваться при выборе оптимальных характеристик ШК при минимально необходимых режимных параметрах.

Для того чтобы учесть влияние продольной подачи S_l при расчете высоты шероховатости можно воспользоваться формулой Е. Н. Маслова [46]:

$$Rz = Rz_1 \cdot \varepsilon^{\left(\frac{B}{S_l} - 1\right)}, \quad (1.16)$$

где Rz_1 – высота шероховатости без продольной подачи; ε – коэффициент ($\varepsilon = 0,75$); B – ширина круга, мм; S_l – продольная подача. При $S_l = B$, величина $Rz = Rz_1$.

Исследованиями [3, 57, 62, 64, и др.] установлено, что с увеличением S_2 величина Ra повышается. Анализ экспериментальных данных показал, что при чистовых режимах шлифования – $S_2 = 0,15 \dots 0,25$ мм/мин величина Ra меньше, чем при шлифовании на получистовых – $S_2 > 0,3$ мм/мин.

Обработка опытных данных, предложенная Е. Н. Масловым [46], позволила получить эмпирическую формулу по расчету шероховатости поверхности:

$$Ra = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot t^{Z_a} \cdot S_1^{U_a} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu \cdot H^n}, \quad (1.17)$$

где C_a – коэффициент, учитывающий физико-механические свойства обрабатываемого материала; X_a , Y_a , Z_a , U_a и K_1 , K_2 , K_3 , K_4 – соответственно показатели степени и коэффициенты пропорциональности, определяемые экспериментально.

Рассмотрим пример расчета шероховатости поверхности при профильном врезном шлифовании дорожки качения. В формуле Е. Н. Маслова [46] показатель степени U_a и h равны 0, поэтому формула имеет вид

$$Ra = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot t^{Z_a} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu}. \quad (1.18)$$

При этом $K_1 = 1,0$; $K_2 = 1,0$; $K_3 = 1,4$ (т.к. зачистные проходы отсутствуют), $K_4 = 1,0$. Величина t_ϕ в данном выражении определяется как $\frac{S_2}{n_3}$, тогда формула (1.18) преобразуется к виду:

$$Ra = \frac{C_a \cdot V_1^{Y_a} \cdot S_2^{Z_a} \cdot K_3}{V_k^{X_a} \cdot d_3^\mu \cdot n_3^{Z_a}}. \quad (1.19)$$

Находим показатели степени при $C_a = 70 - 0,6 \cdot 55 = 37$ и подставляем в формулу (1.11). Получим при черновом шлифовании:

$$Ra = \frac{37 \cdot 48^{0,75} \cdot 0,42^{0,5} \cdot 1,4}{40_k^{0,95} \cdot 70^{0,1} \cdot 218^{0,5}} = 0,82 \text{ мкм.}$$

Таким образом, данную формулу можно использовать для инженерных расчетов, т.к. опытные данные совпадают с результатами исследований других авторов [1, 31, 43, 46, 54, 62, 64, 68 и др.].

1.4. Связь геометрических параметров поверхности приборных подшипников с их надёжностью и долговечностью

В результате анализа литературных данных можно выделить следующие геометрические параметры поверхности, оказывающие существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей машин: параметры шероховатости шлифованной поверхности Ra , Rz (ГОСТ 2789 – 73 [18] или СТСЭВ 638 – 77), отклонение от круглости Δ_k , гранность Δ_r , волнистость Δ_b , точность профиля дорожек качения Δ_n и т.д.

Одними из основных показателей качества приборных подшипников являются надёжность и долговечность, которые определяют их эксплуатационные свойства [11, 29, 31, 74, 78, 84, 103 и др.]. Эксплуатационные показатели непосредственно связаны с функциональными параметрами [92], к которым относят параметры качества применяемых материалов [44], параметры механических свойств поверхностного слоя дорожек качения колец приборных подшипников [35], которые могут формироваться в результате различных упрочняющих технологий [34, 47], геометрические параметры точности и качества изготовления подшипников. К микрогеометрическим параметрам наряду с размерами поверхностей относятся и параметры микронеровностей поверхностей подшипников [5, 17 – 19, 48, 52,]: отклонение от круглости, гранность, волнистость, отклонение от профиля, шероховатость в продольном и поперечном направлениях.

В ряде исследований [11, 14, 29] отмечается, что качество приборных подшипников влияет на их эксплуатационные показатели. Авторами [84] установлено, что интенсивность изнашивания подшипников зависит от размеров и формы неровностей и дефектов на рабочих поверхностях.

Как установлено [92] долговечность пар трения качения подшипников зависит от усталостного разрушения и выкрашивания контактирующих поверхностей, в результате которых появляются шум и вибрации. Экспериментально подтверждено влияние качества поверхности (микрогеометрических

параметров и дефектов) на долговечность и надежность работы подшипника [11, 34].

В работах [29, 34] показано, что характер микронеровностей поверхности существенно влияет и на контактную жёсткость и виброустойчивость подшипниковых узлов. При этом контактную жёсткость характеризует способность поверхностных слоёв контактирующих тел сопротивляться их деформированию при взаимодействии, и в свою очередь сильно зависит от изменения параметров кривой опорной поверхности.

Таким образом, на основании приведённых данных можно сделать вывод о том, что оценка микрогеометрических параметров рабочих поверхностей подшипников как на этапе их изготовления, так и при их эксплуатации является одной из первостепенных задач в плане повышения качества приборных подшипников.

В таблице 1.1 приведены геометрические параметры рабочих поверхностей подшипников, которые, согласно литературным данным [20, 92, 103], необходимо нормировать в зависимости от эксплуатационных условий.

Таблица 1.1

Требуемые геометрические параметры рабочих поверхностей подшипников в зависимости от их эксплуатационных свойств

Эксплуатационное свойство	Геометрические параметры рабочих поверхностей		Направление неровностей, дефекты (+)
	Точность	качество	
1	2	3	4
Контактная жёсткость	$\Delta_k, \Delta_\Gamma, \Delta_B, \Delta_\Pi$	$Ra, S_m, b_p, (R_p^2), t, R_{max}$	$\backslash, +$
Износостойкость	$\Delta_k, \Delta_\Gamma, \Delta_B, \Delta_\Pi$	$Ra, S, b, (R_p), t_m$	$\backslash, +$
Прочность	Δ_Π	R_{max}, S, t_m, R_{max}	$\backslash, +$

Продолжение таблицы 1.1.

Усталостная прочность	$\Delta_K, \Delta_\Gamma, \Delta_B$	$R_{max}, S_m, t_m, R_{max}$	$\backslash\backslash, +$
Контактная прочность	Δ_K	$Ra, S_m, b_p (R_p), t_m$	$\perp, +$
Фреттингостойкость	Δ_Γ, Δ_B	$Ra, S_m, b_p (R_p)$	$\perp, +$
Виброустойчивость	Δ_K	$Ra, S_m, b_p (R_p)$	$\perp, +$
Коррозионная стойкость	Δ_Γ, Δ_B	Ra, S_m, S, R_{max}	$+$
Прочность сцепления	Δ_K	Ra, S_m, t_m, R_{max}	$\backslash\backslash, +$
Герметичность соединений	$\Delta_K, \Delta_\Gamma, \Delta_B$	$Ra, S_m, b_p (R_p), t_m$	$\perp, +$
Прочность посадок	$\Delta_K, \Delta_\Gamma, \Delta_B,$	$Ra, b_p, (R_p), t_m,$ R_{max}	$\backslash\backslash, +$
Теплопроводность	$\Delta_K, \Delta_\Gamma, \Delta_B$	$Ra, S_m, b_p (R_p)$	$\backslash\backslash, +$

При этом наибольшее распространение из геометрических параметров поверхности, как в отечественной промышленности, так и за рубежом получил параметры: Δ_K, Ra и дефекты. Зачастую для поверхностей, имеющих малые размеры или сложную конфигурацию, прямой контроль параметра Ra не возможен, поэтому нормируется параметр Rz . Параметр R_{max} нормируется, когда для обеспечения статической и усталостной прочности подшипников необходимо знать максимальный размер рисок или дефектов [48, 52]. В дополнение к количественным геометрическим параметрам иногда нормируется и направление неровностей.

Переход от одних высотных параметров шероховатости к другим можно осуществить, используя соотношения параметров шероховатости для различных видов механической обработки поверхностей [48]: при абразивной обработке: $Rz = 5Ra$; $R_{max} = 7,0Ra$, при отделочно-упрочняющей обработке поверхностно-пластическим деформированием $Rz = 4,0Ra$; $R_{max} = 5,0Ra$. Для ответственных рабочих поверхностей деталей кроме высотных параметров нормируется так же шаговый параметр S_m и параметр b_p .

1.5. Методы и средства измерения параметров микрогеометрии сложных поверхностей

Исследованиям микрогеометрии поверхностей дорожек качения колес приборных подшипников посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых [3, 17, 25, 52, 56, 79, 84, 92, 97, 107, 113, 114 и др.].

На рис.1.7. представлены методы исследования шероховатости поверхностей [17 – 19, 25, 30, 31, 75, 93, 120, 122].

При использовании контактных методов исследования микрогеометрии поверхности параметров возникают следующие сложности [93, 121]:

- процесс измерения параметров шероховатости можно производить только на простых поверхностях (плоских, цилиндрических и т.д.);
- данный метод оценки не дает комплексную оценку распределения микронеровностей по площади поверхности;
- погрешность измерения зависит от радиуса алмазной иглы, механических и электрических колебаний измерительной системы.

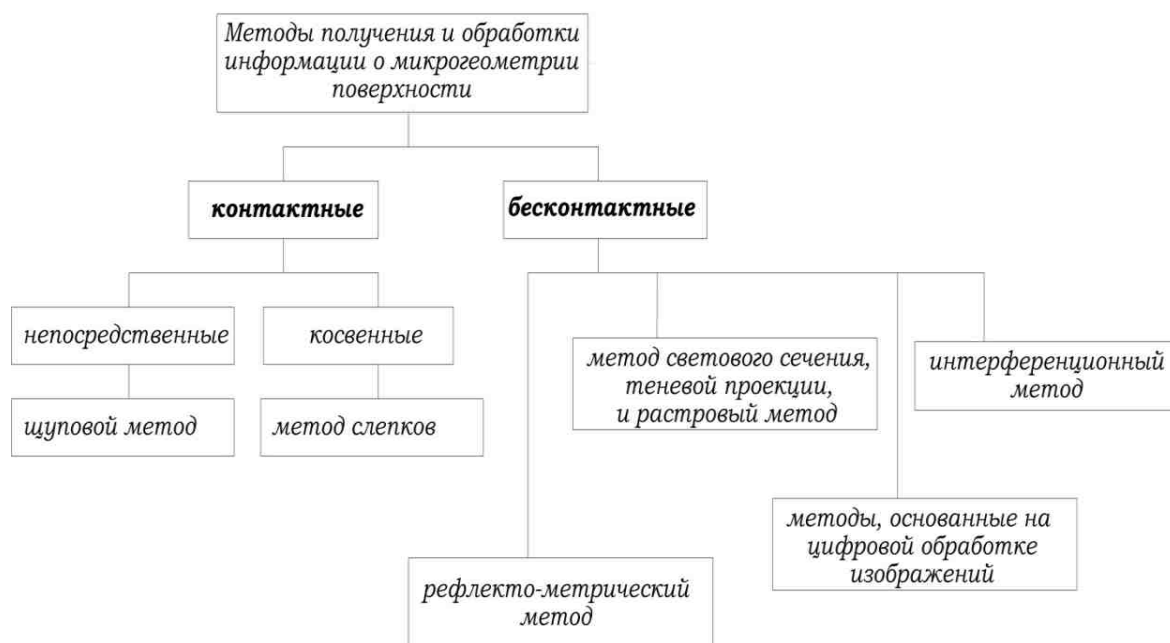


Рис.1.7. Классификация методов измерения шероховатости
поверхностей

Бесконтактные методы исследования микрогеометрии поверхностей [75, 92, 120, 121 и др.] имеют существенные преимущества, в частности, они безынерционны и их использование не наносит повреждение исследуемой поверхности, как правило, они предназначены для измерения микрогеометрии поверхности сложной формы.

Известен также способ измерения параметров шероховатости, основанный на цифровой обработке изображения исследуемой поверхности, введённого при помощи сканера или видеокамеры в компьютер. В этом способе предлагается с помощью пакета прикладных программ в среде MathCad 2000 определять стандартные параметры шероховатости поверхности по изображению поверхности. При этом в качестве высотной характеристики микро-рельефа поверхности принимается яркость (интенсивность) изображения этой поверхности в данной точке.

К недостаткам рассматриваемого способа можно отнести:

1) невысокое быстродействие, так как по исходному полутоновому изображению непосредственно вычисляются стандартные параметры шероховатости;

2) необходимо использовать источник излучения когерентный как во времени, так и в пространстве, что накладывает определённые ограничения на применение данного способа;

3) в качестве высотной характеристики исследуемого рельефа поверхности принимается яркость (интенсивность) изображения в данной точке, то есть амплитуда видеосигнала, на которую может оказывать влияние общий уровень освещённости в помещении, стабильность источника освещения, угол наклона падающего светового потока на исследуемую поверхность и различные блики от посторонних источников освещения.

1.6. Выводы. Цель и задачи исследований

Обобщение результатов поведённого анализа процессов шлифования профиля дорожки качения приборных подшипников, а также методов и средств оценки параметров микрорельефа колец подшипников позволяет сделать следующие выводы:

1. В отечественной и зарубежной технической литературе недостаточно освещены проблемы повышения производительности бездефектного процесса шлифования и получения стабильных параметров качества поверхности, обеспечивающих надежность и долговечность приборных подшипников;

2. Анализ процесса бесцентрового шлифования на жестких опорах колец подшипников показал, что производительность процесса и качество обработанной поверхности зависит от условий и режимов обработки, чистоты и состава СОЖ, характеристик абразивных инструментов;

3. Существующие подходы к процессу образования высоты микронеровностей обработанной поверхности при шлифовании показывают, что необходимо учитывать глубину срезаемого единичным зерном слоя и величину наплывов, а также случайную и периодическую составляющие процесса;

4. Недостаточное внимание уделяется технологической наследственности и проблеме формирования дефектов при шлифовании дорожек качения колец подшипников, не в полной мере освещены особенности шлифования подшипниковых сталец с применением водной СОЖ;

5. Большое влияние на качество поверхности оказывают характеристики абразивного инструмента; экспериментальные исследования шероховатости поверхности показали, что с увеличением зернистости ШК в 4 раза величина Ra повышается в 3 раза, а с увеличением твердости круга уменьшается, применение масляных СОЖ снижает высоту шероховатости на 20 – 25 %;

7. Нет корректных моделей исследования напряженно-деформированного состояния колец подшипников в процессе шлифования на

жестких опорах и формирования на дорожке качения приборного подшипника от действия упругих деформаций отклонения от круглости;

8. Нет приемлемых методик оценки микрогеометрии сложных поверхностей. Практически отсутствуют методики количественной оценки дефектов, возникающих при шлифовании, и рекомендации по снижению брака по этому показателю при изготовлении колец подшипников;

9. Большое распространение получили эмпирические зависимости, позволяющие определить влияние режимов и условий шлифования на величину Ra , однако в этом случае количественно величина шероховатости на 10 – 20 % ниже расчетных данных;

10. Отсутствуют результаты по оптимизации режимов шлифования дорожек качения колец подшипников на жестких опорах в зависимости от точности и качества поверхности, состава и чистоты СОЖ.

Таким образом, целью работы является повышение производительности обработки и обеспечение геометрических параметров точности и качества поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников при шлифовании на жестких опорах.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующего технологического процесса профильного шлифования дорожки качения внутреннего кольца подшипника на жестких опорах и определить пути повышения его производительности.

2. Разработать конечно-элементную модель процесса профильного шлифования дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника на жестких опорах при разных режимах обработки и параметрах наладки.

3. Разработать методику оценки микрогеометрии и дефектов поверхности при шлифовании дорожки качения колец подшипников на жестких опорах с использованием оптико-электронного комплекса.

4. Провести исследования влияния различных составов СОЖ на производительность и геометрические параметры точности и качества поверхности

(шероховатость, волнистость, точность формы, дефекты, прижоги и др.) при профильном шлифовании дорожки качения внутреннего кольца подшипника.

5. Исследовать влияние чистоты СОЖ на образование дефектов поверхности дорожки качения при профильном шлифовании.

6. Определить 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. Провести технико-экономический анализ, опытно-промышленную проверку и внедрение результатов исследования в производство.

8. Внедрить оптико-электронный комплекс для исследования микрогеометрии и дефектов поверхности дорожек качения колец подшипников, полученных при шлифовании.

Глава 2. Модель деформации кольца подшипника в процессе бесцентрового шлифования на жестких опорах

Наибольшие трудности при шлифовании дорожек качения внутренних колец подшипников вызывает стабильное обеспечение величины отклонения от круглости, которое в ряде случаев выходит за пределы допуска [5, 25]. Полученные при шлифовании отклонение от круглости Δ_k , оказывают существенное влияние на погрешности формы следующих технологических операций (суперфиниширование и полирование) [5, 14, 21, 69]. Авторы [22] считают, что при обработке на жестких опорах заготовка (кольцо) не деформируется. Однако при шлифовании колец приборных подшипников нельзя исключить действие силы резания на деформацию колец при обработке.

Известно [34, 36, 58, 59], что при шлифовании на напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя кольца подшипника влияют следующие технологические условия обработки: схема и режимы шлифования, состояние оборудования, состав технологических сред, характеристики ШК, изменяющие силовой, динамический и температурный режимы процесса резания. Выбор перечисленных параметров необходимо осуществлять в строгой зависимости от требуемой геометрической точности обрабатываемой поверхности. На сегодняшний день такие исследования для операций врезного шлифования на жестких опорах практически отсутствуют. С целью преодоления перечисленных ограничений для исследования упругой деформации кольца подшипника при обработке был применен метод конечных элементов, реализация которого производилась посредством программного комплекса ANSYS.

Программный комплекс ANSYS предлагает широкий спектр возможностей конечно-элементного анализа, начиная от простого линейного стационарного анализа и заканчивая комплексным нелинейным анализом переходных процессов.

Метод конечных элементов (МКЭ) [26, 27, 55, 59, 71, 81, 82, 101, 102, и др.], на котором основывается программа, является в настоящее время одним из основных методов решения вариационных задач. Современные системы автоматизированного инженерного анализа (CAE – системы) считаются неотъемлемой частью технологий автоматизированного проектирования. Они позволяют моделировать различные воздействия внешней среды и условий работы на изделие и рассчитывать практически любые физические поля (поля напряжений и перемещений в силовых конструкциях, поля температуры, давлений, скоростей и т.п.). В настоящее время методы и модели инженерного анализа с успехом используются при проектировании и оптимизации самых разных машиностроительных изделий и технологий [26].

2.1. Создание модели и исходные данные

Статический анализ процесса шлифования на жестких опорах дорожки качения колец приборных подшипников, выполненный в программном комплексе ANSYS, позволил определить величину деформаций, а так же характер распределения и величину поля напряжений в исследуемой модели.

Процедура проведенного расчета в программном комплексе включала следующие основные этапы: создание расчетной, а затем конечно-элементной модели, определение граничных условий, проведение статического анализа, анализ теоретических результатов исследований влияния режимов и условий наладки процесса шлифования на деформацию колец подшипников.

Расчетная модель, выполняемая при помощи метода конечных элементов, стремиться к созданию реальной технологической системы. Данная модель включает все основные параметры физической системы.

Определение граничных условий в МКЭ заключается в наложении ограничений на перемещения элементов, приложении нагрузки к элементам и узлам их соединения, задание свойств материалов.

Дискретные уравнения движения узлов модели при проведении расчетов метод конечных элементов представляются в виде матричного уравнения [6]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}, \quad (2.1)$$

где $\{u\}$ – вектор узловых перемещений всей модели; $\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$ – векторы ускорений и скоростей точек модели; $[K]$, $[C]$, $[M]$ – «глобальные» матрицы жесткости, демпфирования и масс для всей модели соответственно; $\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых сил.

Деформации связаны с перемещениями узлов соотношением [6]:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}, \quad (2.2)$$

где $\{\varepsilon\}$ – результирующий вектор деформаций элемента; $[B]$ – матрица деформаций-перемещений, обусловленная функциями формы элемента.

Напряжения в модели рассчитываются на основе уравнения [6]:

$$\{\sigma\} = [K]\{\varepsilon\}, \quad (2.3)$$

где $\{\sigma\}$ – результирующий вектор напряжений элемента.

В расчете использовались линейные изотропные свойства материала приборного кольца подшипника (сталь ШХ15 ГОСТ 4543 – 71):

- 1) плотность $\rho = 7812 \text{ кг/м}^3$;
- 2) модуль упругости первого рода (модуль Юнга) $E = 2,11 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Расчетная модель создавалась на основе схемы действия сил при шлифовании на неподвижных опорах, разработанной проф. Захаровым О. В. При этом нагрузки для выполнения статического анализа представлялись в виде векторов сил резания, которые направлены в обратную сторону оси УУ. Для удобства обработки полученных результатов, была использована локальная система координат, которая позволила получить положительные значения исследуемых величин.

На рис.2.1 представлена схема для проведения статического анализа кольца подшипника на основе модели, разработанной проф. Захаровым О.В.

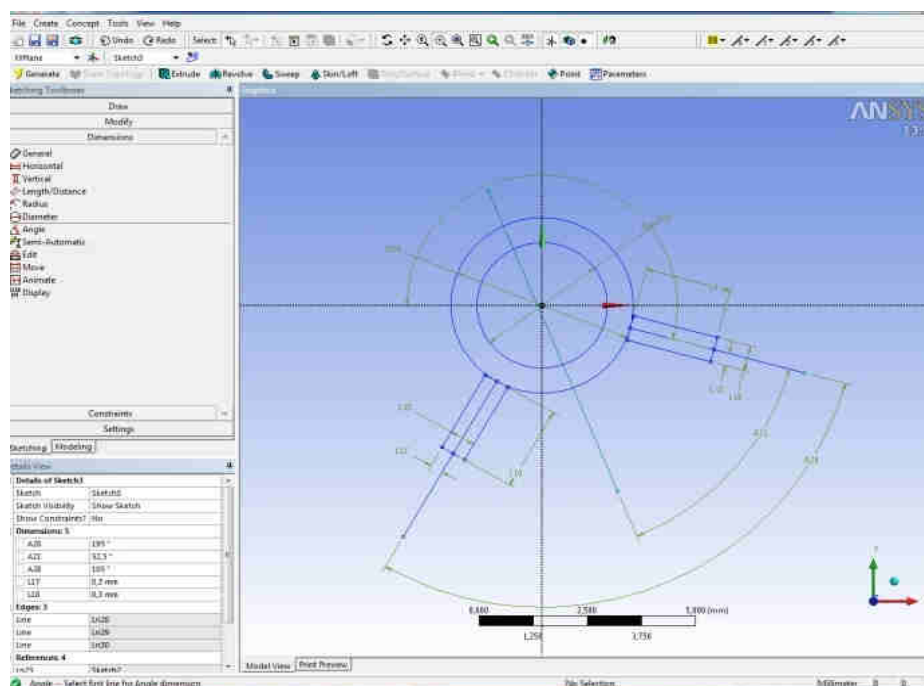


Рис.2.1. Геометрическая схема установки кольца подшипника на жесткие опоры

Предложенная расчетная модель процесса деформации кольца приборного подшипника соответствует реальной технологической системе и позволяет определить ее статические характеристики с приемлемой точностью для решения задачи.

2.2. Расчет сил резания при профильном шлифовании

В процессе шлифования дорожки качения внутреннего кольца подшипника использовался шлифовальный круг с размерами 1 – 355 x 8 x 127 91AF320M9V22. Кольцо устанавливается на жесткие опоры. Технические характеристики приспособления позволяют настраивать регулирующую опору на углы $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$.

Известно [46], что суммарная сила резания P шлифовальным кругом считается составленной от действия сил: нормальной или радиальной P_y и тангенциальной P_z (см. рисунок 1.5). При шлифовании, когда микрорезание

осуществляет одновременно большое количество зерен, суммарная нормальная сила P_y всегда больше суммарной тангенциальной силы P_z , при чем $P_y/P_z=3/1$. Расчет силы резания P_z производился по следующим формулам:

$$P_z = \frac{998 \cdot N_9}{V_k}, \quad N_9 = C_N \cdot V_1^{y_N} \cdot S^{z_N} \cdot d^{q_N} \cdot b^{p_N}, \quad (2.4)$$

где N_9 – мощность шлифования, d – диаметр заготовки, b – ширина шлифования, S – поперечная подача, V – скорость вращения заготовки, C_N – коэффициент, y_N, z_N, q_N, p_N – показатели степени.

Результаты расчетов сил резания приведены на рис.2.2.

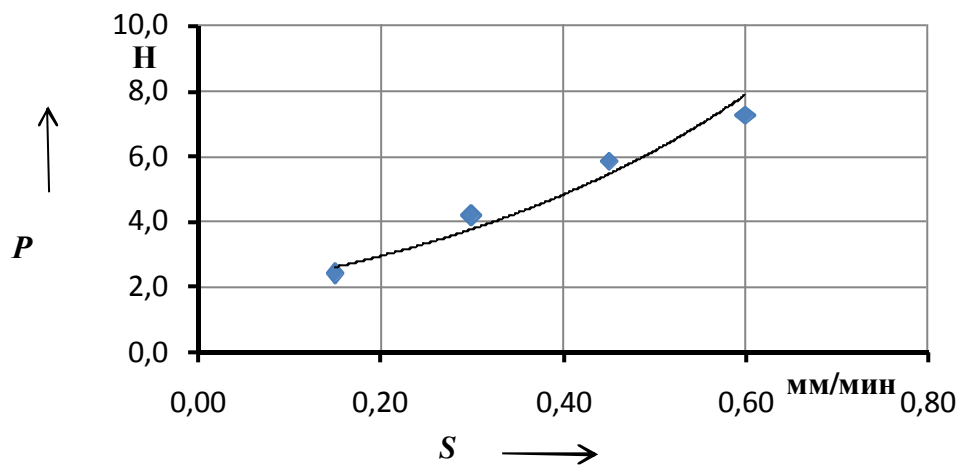


Рис. 2.2. Влияние врезной подачи на равнодействующую силу при шлифовании дорожки качения внутреннего кольца подшипника

Исходные данные для расчета сил резания: материал внутреннего кольца подшипника – сталь ШХ15 HRC 62 – 65, наружный диаметр – 4,2 мм, внутренний диаметр – 3 мм, ширина – 2,5 мм, угол $\beta = 105^\circ$, угол α изменяется от 5° до 20° , при $\alpha < 5^\circ$ – образуются условия вырова кольца с жестких опор силами резания, при $\alpha > 20^\circ$ кольцо занимает неустойчивое положение и может быть вырвано с опор силой F , $V_K = 34,4$ м/с, $V_{черн} = 40$ м/мин, $V_{чист} = 33$ м/мин, $S = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6$ мм/мин, $C_N = 0,14$, $y_N = 0,8$, $z_N = 0,8$, $p_N = 1,0$.

2.3. Моделирование процесса шлифования в программе ANSYS

Моделирование процесса профильного шлифования дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника на жестких опорах осуществляли при помощи программы ANSYS Workbench [80, 82].

Так как мы решали статическую задачу, то выбирали соответствующий тип анализа: Toolbox – Analysis System – Static Structural.

Задание физических свойств материала модели осуществляли с помощью следующего пункта главного меню: Toolbox – Component Systems – Engineering data.

После выполнения команды на экране появлялось меню Outline of Schematic, где можно создать новый материал и меню Properties of Outline Row, в котором задаются необходимые физические свойства.

Задавалась плотность стали ШХ15: Toolbox – Physical – Density.

Задавались модуль упругости и коэффициент Пуассона (сталь ШХ – 15): Toolbox – Linear Elastic – Isotropic Elasticity – Young's Modulus и Toolbox – Linear Elastic – Isotropic Elasticity – Poisson's Ratio.

В CAD – программах так же, как и в ANSYS Workbench форму изделия, с той или иной точностью, аппроксимируют некоторым конечным набором простых геометрических элементов (объектов), так называемых «примитивов»: точек, линий, поверхностей, тел и т. п. Для ограниченного набора примитивов, имеющих однозначное математическое описание, разрабатываются библиотеки компьютерных программ, которые и составляют геометрическое ядро автоматизированной системы. Из этих типовых примитивов с помощью различных операций формируется внутреннее представление уникальной геометрической модели любой сложности.

Команды, использованные для построения геометрической модели и их путь в меню: меню геометрического построения: Toolbox – Component Systems – Geometry; построение эскиза кольца и жестких опор: Tree Outline (де-

рево построения) – XY Plane (выбор плоскости для построения эскиза) – New Sketch – Sketching (рис.2.3).

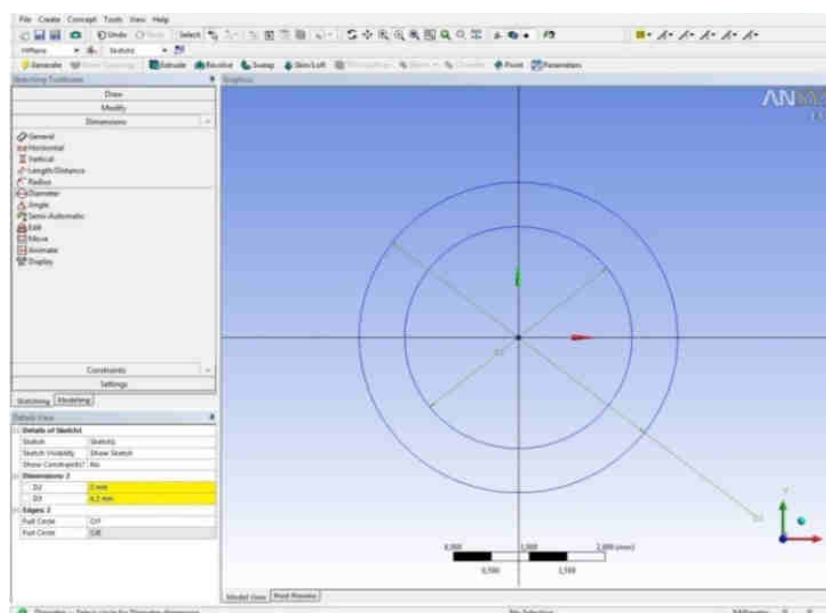


Рис.2.3. Построение эскиза внутреннего кольца приборного подшипника

Далее осуществлялось моделирование твердого тела по построенной геометрии: Concept – Surface from Sketches – Generate (рис.2.4).

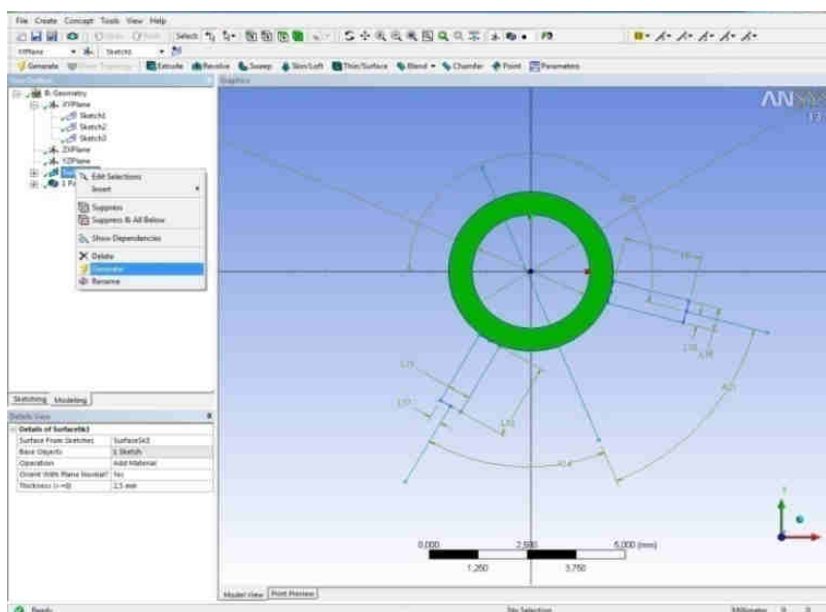


Рис.2.4. Построение твердого тела

Для поверхностей выбирался упорядоченный (Mapped) тип разбиения. Упорядоченное разбиение предназначено для построения конечно-элементной сетки на компонентах с простой геометрией, как правило, близких к четырехугольнику в двумерной модели. При упорядоченном разбиении сетка является регулярной, состоящей из четко прослеживаемых рядов элементов, что позволяет добиться наилучшей сходимости расчетных результатов. Конечно-элементная сетка генерировалась на геометрической модели, оптимальная дискретность сетки находилась экспериментальным путем, чтобы плотность сетки не влияла на результаты расчетов. Таким образом, размер элемента конечно-элементной сетки составил 0,1 мм.

45

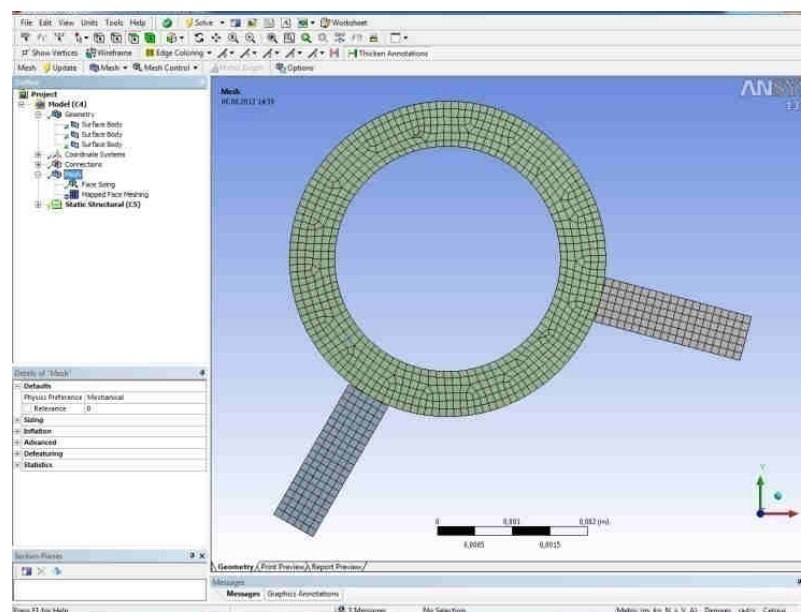


Рис.2.6. Конечно-элементная сетка модели

Затем на созданную модель накладывались граничные условия:

- закреплялась жестко модель по нижнему основанию опор: Outline – Model – Static Structural – Supports – Fixed Support;
- задавалось перемещение в точке приложения силы, чтобы избежать вылета кольца с опоры: Outline – Model – Static Structural – Supports – Displacement;
- прикладывалась равнодействующая сил резания в точку на поверхности кольца: Outline – Model – Static Structural – Loads – Force.

Далее выбирался тип проводимого анализа статический: Main Menu – Solution – Analysis Type – New Analysis – Static.

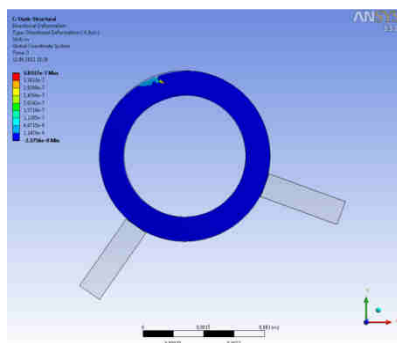
Задавалось время, в течение которого нагрузка действовала на модель, равное времени черновой и чистовой обработки детали: Main Menu – Solution – Analysis Type – Sol'n Controls.

После задания граничных условий и временных параметров осуществлялся запуск задачи на решение: Outline – Model – Solution – Generate.

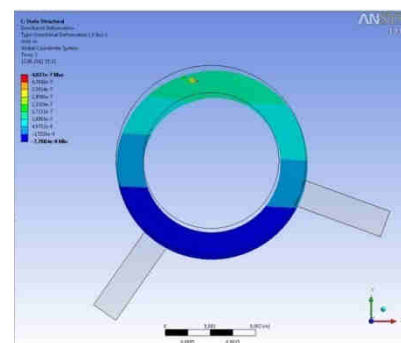
Задача решалась отдельно для каждого из вариантов установки кольца на жесткие опоры ($\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$) при различных значениях врезной подачи ($S = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6$ мм/мин).

2.4. Результаты расчетов в программе ANSYS

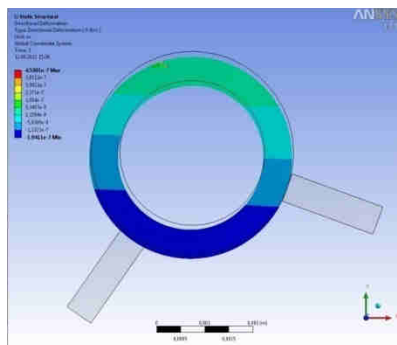
Был произведен анализ напряженно-деформированного состояния кольца в зависимости от различных режимов обработки ($S = 0,15; 0,3; 0,45; 0,6$ мм/мин) и вариантов настройки положения регулируемой опоры. Результаты расчета деформаций представлены на рис.2.7 – 2.10, а эквивалентных напряжений в приложении 1. Для удобства обработки и наглядности результаты анализов, полученные в программном комплексе ANSYS, были представлены в виде изображения распределения полей деформаций и напряжений на модели кольца.



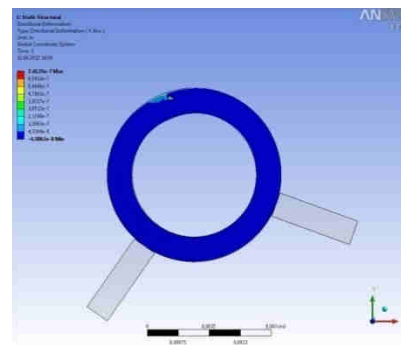
а) $S = 0,15$, мм/мин



б) $S = 0,3$, мм/мин

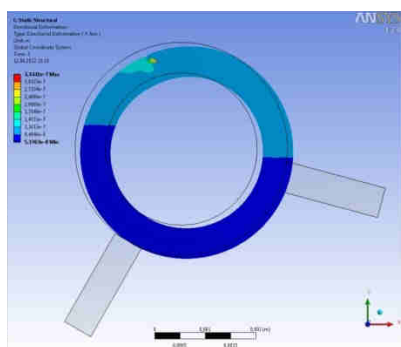


в) $S = 0,45$, мм/мин

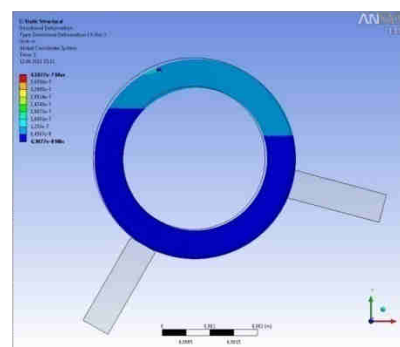


г) $S = 0,6$, мм/мин

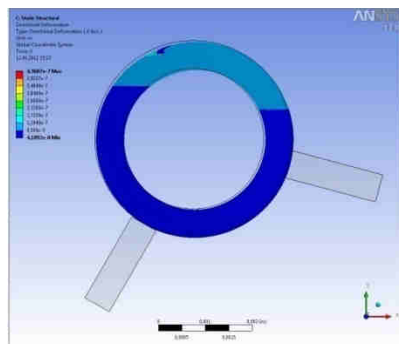
Рис.2.7. Изолинии радиальных перемещений по оси Z ($\alpha = 20^\circ$)



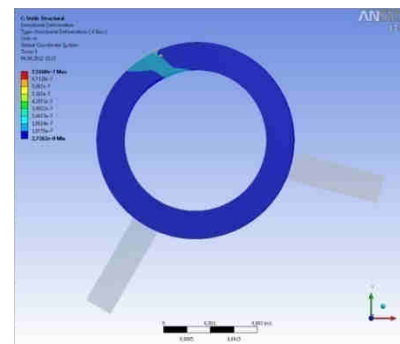
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$

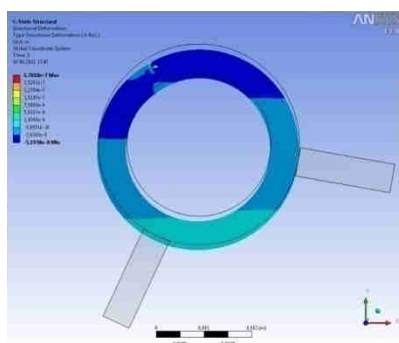


в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

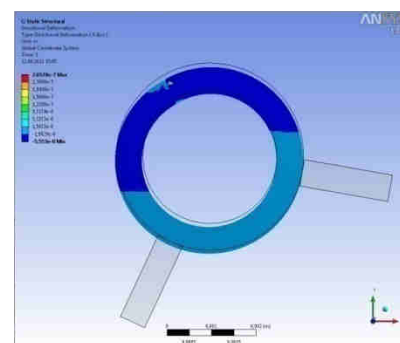


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

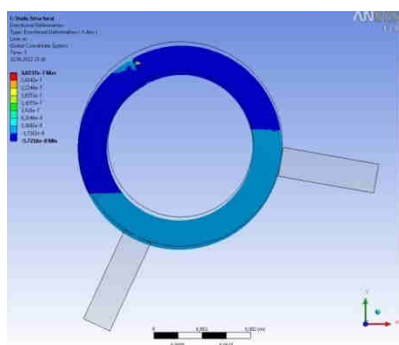
Рис.2.8. Изолинии радиальных перемещений по оси Z ($\alpha = 15^\circ$)



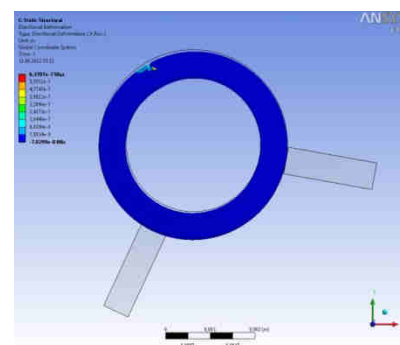
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$

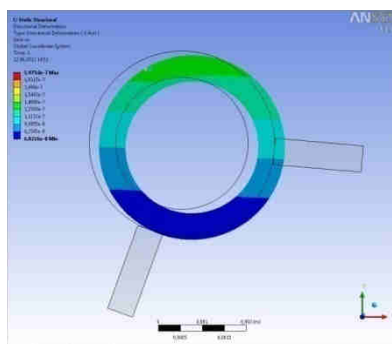


в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

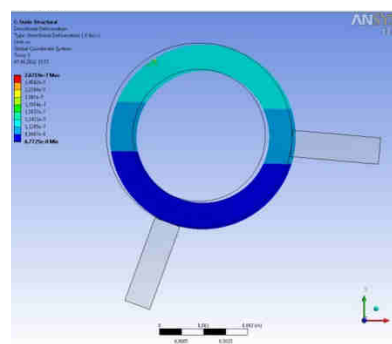


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

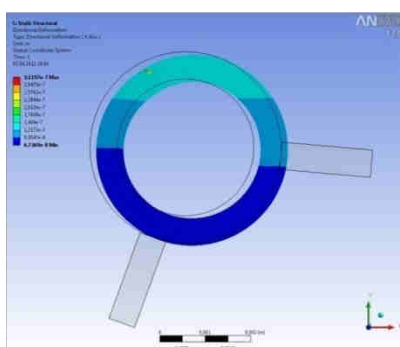
Рис.2.9. Изолинии радиальных перемещений по оси Z ($\alpha = 10^\circ$)



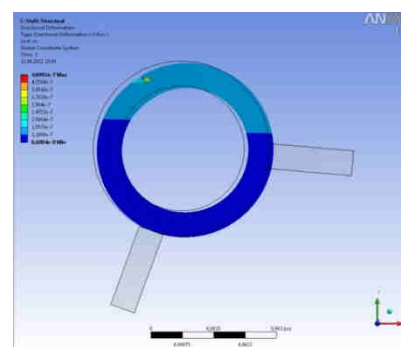
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$



в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$



г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

Рис.2.10. Изолинии радиальных перемещений по оси Z ($\alpha = 5^\circ$)

Проанализировав полученные графики (рис.2.11), пришли к выводу, что с увеличением подачи S от 0,15 до 0,6 мм/мин наблюдался рост величины эквивалентных напряжений: при угле $\alpha = 5^\circ$ от 50 до 250 МПа; при угле $\alpha = 10^\circ$ от 160 до 260 МПа; при угле $\alpha = 15^\circ$ от 170 до 270 МПа; при угле $\alpha = 20^\circ$ от 180 до 330 МПа.

При этом деформация кольца (Δ'_k) также возрастает с увеличением подачи S (рис.2.12). Поэтому для достижения оптимальных условий процесса шлифования дорожки качения, т. е. соотношения величин напряжений и деформаций, следует применять наладку жестких опор при угле $\alpha = 5 - 10^\circ$.

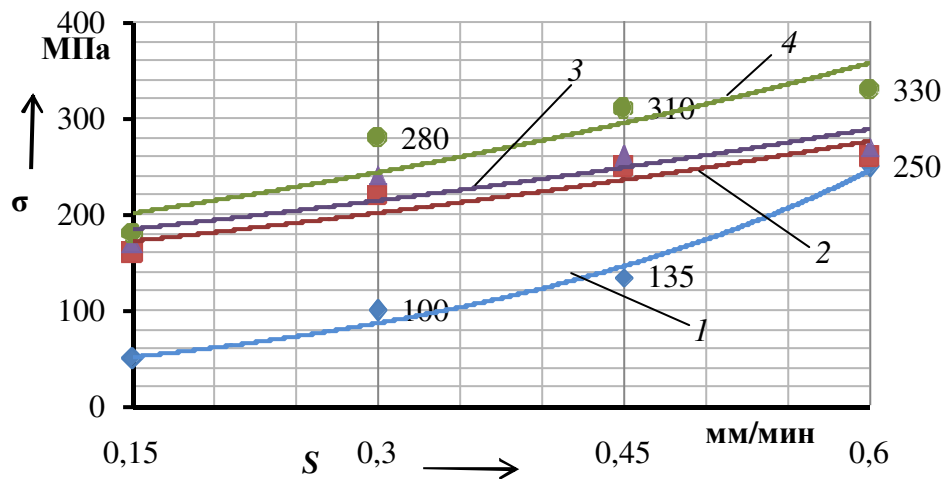


Рис.2.11. Влияние врезной подачи S на величину эквивалентных напряжений σ : 1 – при угле $\alpha = 5^\circ$ положения регулируемой опоры, 2 – при угле $\alpha = 10^\circ$ положения регулируемой опоры, 3 – при угле $\alpha = 15^\circ$ положения регулируемой опоры, 4 – при угле $\alpha = 20^\circ$ положения регулируемой опоры

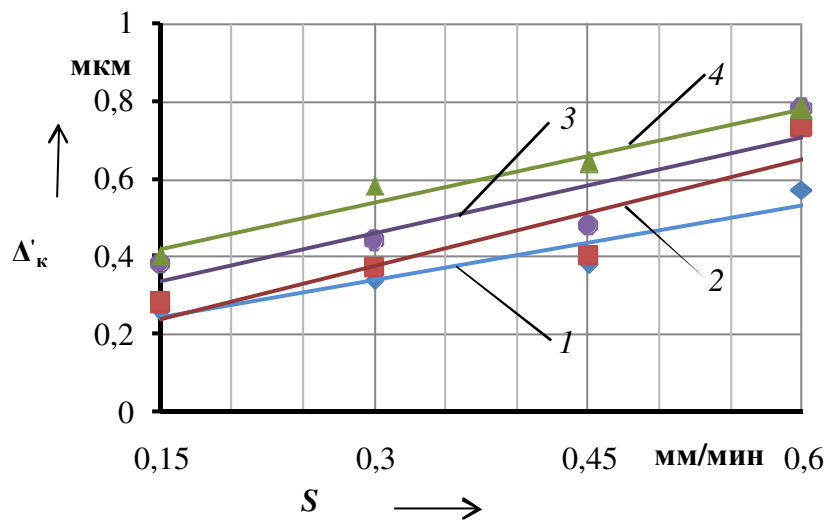


Рис.2.12. Зависимость деформации кольца Δ'_k подшипника от величины врезной подачи S : 1 – при угле $\alpha = 5^\circ$ положения регулируемой опоры, 2 – при угле $\alpha = 10^\circ$ положения регулируемой опоры, 3 – при угле $\alpha = 15^\circ$ положения регулируемой опоры, 4 – при угле $\alpha = 20^\circ$ положения регулируемой опоры

Исследования данной теоретической модели процесса взаимодействия ШК и кольца подшипника показали, что при шлифовании силовые нагрузки формируют в поверхностном слое эквивалентные напряжения, которые с увеличением поперечной подачи повышаются и вызывают деформацию нежестких колец.

Рассмотрим процесс формирования отклонения от круглости дорожки качения внутреннего кольца подшипника в результате деформации кольца.

В начальный момент времени заготовка кольца устанавливается на жесткие опоры, расположенные под углом β , наружная и внутренняя поверхности кольца имеют цилиндрическую форму (см. рис.2.13 а). При нагружении кольца статическими силами резания оно упруго деформируется на величину Δ'_k , приобретая сложную форму (см. рис.2.13 б).

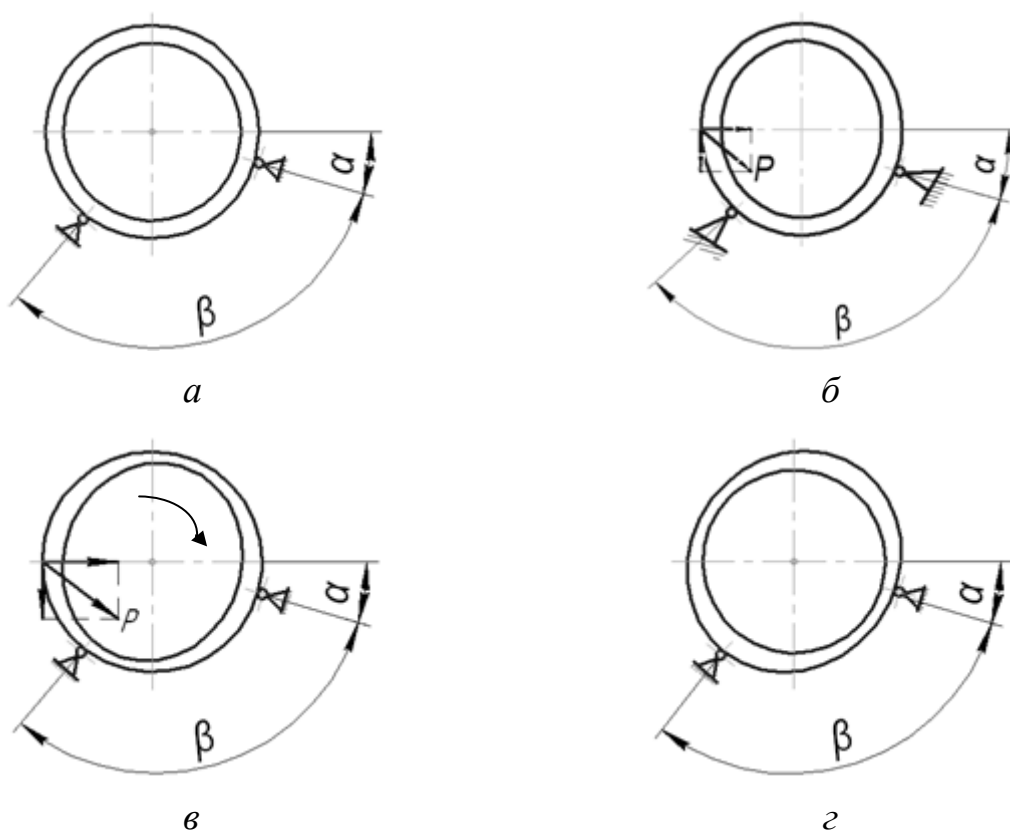


Рис.2.13. Схемы формирования отклонения от круглости дорожки качения внутреннего кольца подшипника в результате деформации Δ'_k

Величина и форма деформации определялась по расчетам в программе ANSYS. В процессе шлифования абразивный круг снимает припуск, в результате наружная поверхность кольца становится цилиндрической, а внутренняя поверхность все еще находится в упругом состоянии (см. рис.2.13 в). При снятии нагрузки и окончании процесса шлифования упругая деформация возвращает кольцо в исходное состояние, в результате внутренняя поверхность становится цилиндрической, а наружная поверхность приобретает форму, полученную в процессе деформации, соизмеримую с отклонением поверхности от круглости (см. рис.2.13 г).

Таким образом, установлено, что отклонение от круглости кольца подшипника Δ_k при шлифовании на жестких опорах формируется от действия 3-х факторов: упругих деформаций кольца в процессе шлифования, отклонения от круглости базовых поверхностей колец подшипников и погрешности базирования кольца подшипника при установке на жесткие опоры, установленной в работе [22].

Анализ технологического процесса изготовления дорожки качения, используемого на предприятии, показал, что требуемое качество поверхности после обработки шлифованием не достигается, и что необходимо усовершенствовать процесс. В дальнейшем необходимо провести экспериментальные исследования по определению влияния деформаций, полученных при шлифовании, на отклонение от круглости.

Выводы:

1. Использование CAE-систем (модулей), таких как ANSYS, позволяет исследовать процесс деформирования колец подшипников при шлифовании.
2. Установлено, что эквивалентные напряжения приводят к деформации поверхности кольца и появлению отклонения от круглости профиля дорожки качения.
3. Разработана компьютерная модель процесса шлифования дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника, которая позволила ис-

следовать влияние режимов шлифования и технологической наладки на деформацию кольца.

4. При шлифовании дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника для уменьшения величины деформации поверхности кольца необходимо располагать регулируемую опору под углом $\alpha = 5 - 10^\circ$ от горизонтальной оси кольца.

Глава 3. Исследование микрогеометрии поверхности дорожек качения колес приборных подшипников оптико-электронным комплексом

3.1. Методика оценки микрогеометрии поверхности оптико-электронным комплексом

Современные производственные условия обуславливают необходимость применения таких конструкций и методов измерения, которые позволяют повышать производительность, степень автоматизации и достоверность операций контроля. Эффективность данных операций зависит от правильно выбранных методов и средств измерений, а также возможностей программного обеспечения.

В связи, с вышеизложенным, в работе предложена новая методика оценки микрогеометрии и дефектов поверхности дорожек качения, которая включает:

1. Оптико-электронный комплекс и программное обеспечение;
2. Подготовку эталонных образцов;
3. Обработку видеоизображений и получение бинарных изображений поверхности;
4. Создание корреляционных поверхностей;
5. Построение бинарных корреляционных поверхностей и расчеты параметров корреляционной поверхности.

3.1.1. Оптико-электронный комплекс и программное обеспечение

На рис.3.1 показан исследовательский комплекс, разработанный [3, 4, 124], который включал: инструментальный микроскоп ИМЦЛ, на котором закреплялся участок анализируемой поверхности (1), с помощью телевизионной камеры с ПЗС – матрицей (видеокамера Computar ZC-F11CH3-(3)), ви-

деоизображение записывалось в память ЭВМ (4). С помощью программного обеспечения видеоизображение обрабатывалось в полутоновое изображение поверхности формата $K_1 \times K_2$ пикселей, полученные результаты распечатывались на принтере 5.

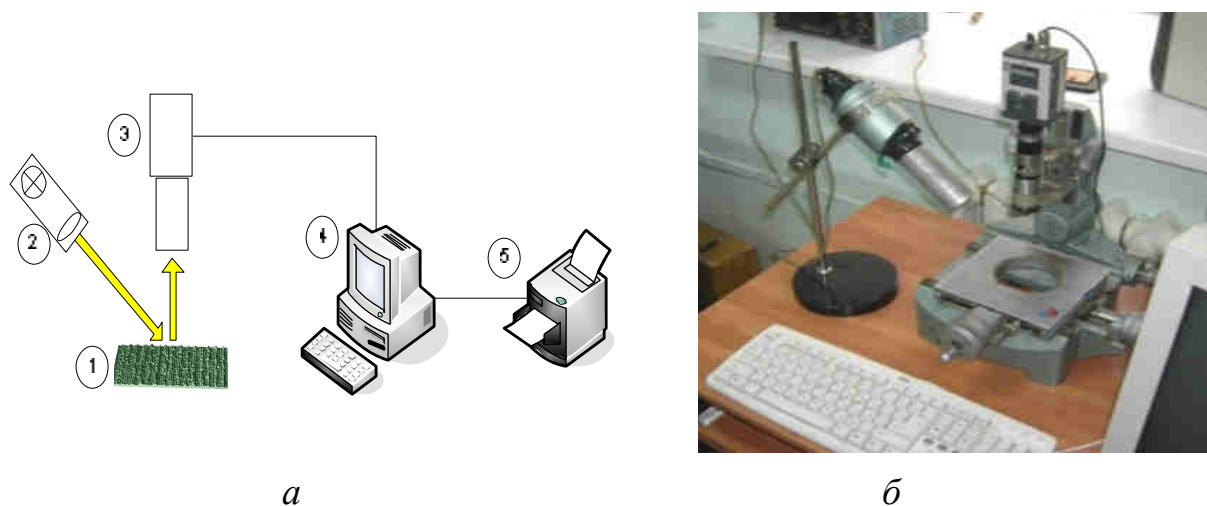


Рис.3.1. Схема исследовательского комплекса (а) и
опытная установка (б)

Оптико-электронная система комплекса предназначена для обработки видеоизображений размером $7,5 \text{ мм}^2$. Световой поток падал на исследуемую поверхность под углом 45° (2). Для разработки программного обеспечения авторами [3, 4] использовались: системы Microsoft DirectShow, Visual Studio 2010, Borland Delphi 7 и C++. Формат видеокадра поверхности дорожки качения записывался в память компьютера через плату видеовхода. Образцы внутренних колец подшипников имели тороидальную форму с продольным радиусом 2,1 мм и поперечным радиусом 0,8 мм, поэтому требовалось скорректировать программу преобразования данной формы поверхности в плоскую, при этом размер окна уменьшился и составил 120×140 пикселей.

3.1.2. Подготовка эталонных образцов

В качестве эталонных образцов были взяты внутренние кольца приборного подшипника №2000083S (сталь ШХ15 HRC 63 – 65), обработанные на круглошлифовальном станке модели «Брайант М – 1» на жестких опорах. Обработка производилась шлифовальным кругом следующих характеристик: 91AF320M9V22 (91A M40 C1 9 K22), размер круга 355 x 16 x 127 мм с различными режимами шлифования и использованием масляной СОЖ (см. таблицу 3.1), которые позволили получить целый ряд колец с разной шероховатостью.

Величина шероховатости Ra измерялась на профилографе модели SJ – 201P, в каждой партии исследовались 20 – 30 колец.

Таблица 3.1

Режимы шлифования дорожек качения внутренних колец подшипников №2000083S и величина шероховатости Ra

Вид СОЖ	Режимы шлифования	Шероховатость поверхности эталонов Ra , мкм				
		0,56	0,13	0,084	0,048	0,025
Масло ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3 %	V_k , м/с	35	35	35	35	35
	V_l , м/мин	30	40	50	50	50
	S_2 , мм/мин	1,1	0,66	0,4	0,32	0,24

Видеоизображения поверхности эталонных образцов имели размер $1 \times 1,5$ мм, а формат видеокadra $K_1 \times K_2$, который в памяти компьютера составил 120×140 пикселей. Полученные видеоизображения шлифованной поверхности (тороидальной) приведены на рис.3.2.

Процесс обработки видеоизображения поверхности производился с помощью специально разработанной алгоритма и программы на ЭВМ [3, 4] в

формате 1 пиксель – 1 байт. При этом уровень яркости видеосигнала изменялся от 0 до 255 условных единиц.

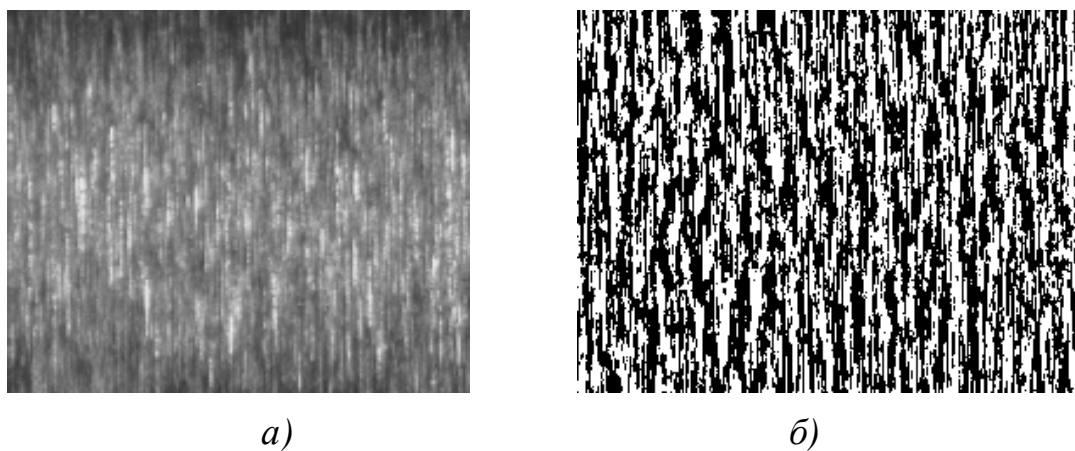


Рис.3.2. Видеоизображение шлифованной поверхности кольца (а)
и его бинарное изображение (б)

3.1.3. Обработка видеоизображений и получение бинарных изображений поверхности

Получение бинарного изображения поверхности осуществлялось следующим образом, в левом верхнем углу исходного изображения устанавливалось базовое окно размером от $N_b \times N_b$ пикселей, при этом определялся средний уровень яркости B_{cp} . Затем значение B_{cp} сравнивалось со значением яркости B_i центрального элемента этого окна по правилу белое-черное: если $B_i \geq B_{cp}$, то белое, если $B_i < B_{cp}$, то черное. Далее базовое окно перемещалось на 1 пиксель вправо и производилось сравнение следующего центрального элемента в этом окне, количество сравниваемых значений зависело от размера видеоизображения в одном направлении, а количество полос размером в 1 пиксель равно формату видеоизображения в другом направлении. Таким образом, исходное видеоизображение преобразовывалось в бинарное (рисунок 3.2 б). Затем бинарные изображения поступали для дальнейшей обработки и преобразования в корреляционную поверхность.

3.1.4. Создание корреляционных поверхностей

Создание корреляционных поверхностей осуществлялось следующим образом. Бинарное изображение поверхности обрабатывалось по методике описанной выше, при этом задавался следующий эталон размером $N_k \times N_k$ пикселей. Размер эталона определяется экспериментально в зависимости от требуемой задачи исследования. Затем подсчитывалась сумма совпавших пикселей в эталоне и в текущем участке, которая по смыслу соответствовала значению коэффициента корреляции. Нормированный коэффициент корреляции определялся путем деления найденной суммы на 1680. При совпадении эталона и текущего участка бинарного изображения коэффициент корреляции равнялся 1, при несовпадении эталона с текущим участком бинарного изображения значение коэффициента корреляции было меньше 1. Таким образом, осуществлялся подсчет коэффициента корреляции по всему полю бинарного изображения и строилось корреляционное поле (см. рис.3.3).

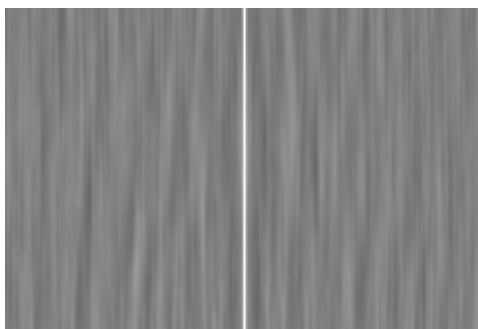


Рис.3.3. Нормированная автокорреляционная поверхность

Рассмотрим применение этого метода по взаимному положению эталона и текущего участка бинарного изображения размером $K_1 \times K_2$ элементов.

Принятый эталон записывается в блок цифровой обработки сигнала и перемещается по бинарному изображению с шагом в 1 пиксель (см. рис.3.4).

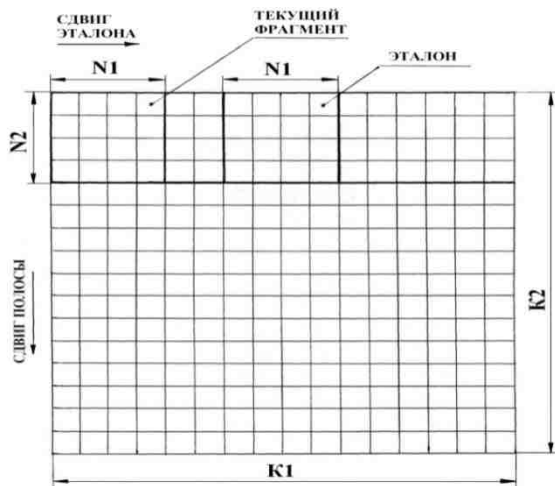


Рис.3.4. Эталон и текущий участок бинарного изображения при корреляционной привязке

Для исследования видеоизображения микрорельефа поверхности через корреляционную функцию использовалась программа [3, 4] на языке Borland Delphi-7. На рис.3.5 показан интерфейс программы для определения корреляционной поверхности.

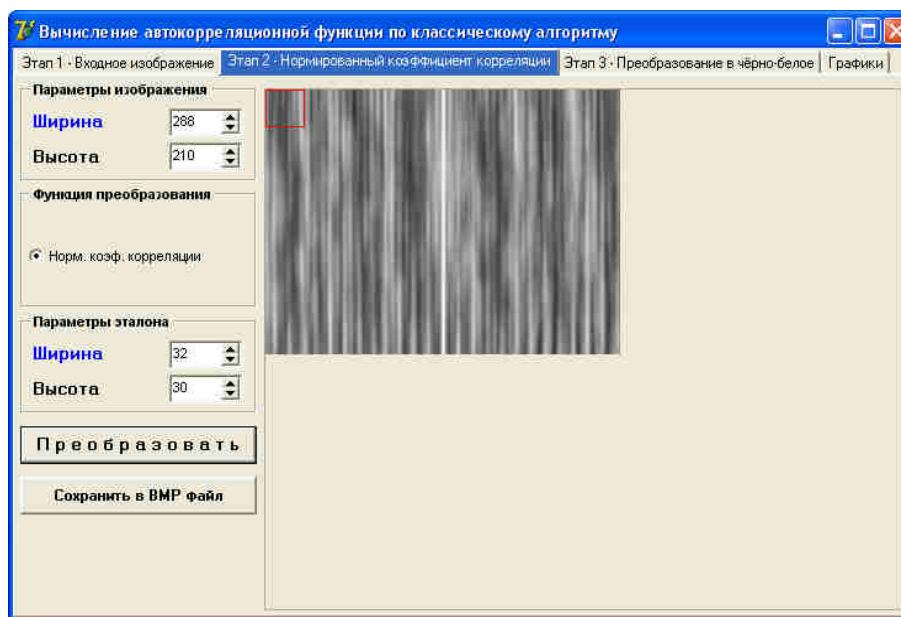


Рис.3.5. Интерфейс для определения корреляционной поверхности

Коэффициент корреляции вычислялся при каждом смещении окна эталона, и определялось его максимальное значение и ошибка измерения по формуле (3.1) [4]:

$$r_{xy}(k_1, k_2) = \frac{\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u) \cdot (x(n_1 - k_1, n_2 - k_2) - m_x)}{\sigma_1 \cdot \sigma_2}, \quad (3.1)$$

где (n_1, n_2) индексы элементов в окне эталона, (k_1, k_2) – координаты эталона внутри зоны поиска $K_1 \times K_2$, 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.

Значения σ_1 и σ_2 определялись по формулам:

$$\sigma_1 = \left[\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (u(n_1, n_2) - m_u)^2 / M \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.2)$$

$$\sigma_2 = \left[\sum_{n_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_2=0}^{N_2-1} (x(n_1, n_2) - m_x)^2 / M \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3.3)$$

где $M_I = N_I \times N_2 - 1$ – количество точек дискретизации в сравниваемых изображениях минус единица для получения несмещённой оценки.

Таким образом, получена матрица, размерностью $M_I \times M_2$ коэффициентов корреляции или двумерная дискретная корреляционная функция.

Исследования показали, что при расчете параметров корреляционной функции для размеров окна 120 x 140 пикселей и сканирующего базового эталона 8 x 8 пикселей участвовало 1680 профилей световых сигналов, что практически невозможно при традиционных методах обработки экспериментальных данных.

3.1.5. Построение бинарных корреляционных поверхностей и расчеты параметров корреляционной поверхности

В рассматриваемом методе предусматривалась также возможность задания порога, относительно которого можно преобразовать полученные корреляционные функции в их бинарные изображения. Внешний вид интерфейса для получения бинарных изображений приведён на рис.3.6.

Само преобразование полутонового изображения корреляционной функции (поверхности) в бинарное изображение осуществлялось по следующему правилу: если текущее значение преобразованного корреляционного сигнала B_T из диапазона $00H \div 0FFH$ больше или равно

значению задаваемого порога B_D , то этому элементу присваивалось значение логической единицы, в противном случае – значение логического нуля. В этом случае бинарная поверхность будет иметь вид, как на рис.3.6.

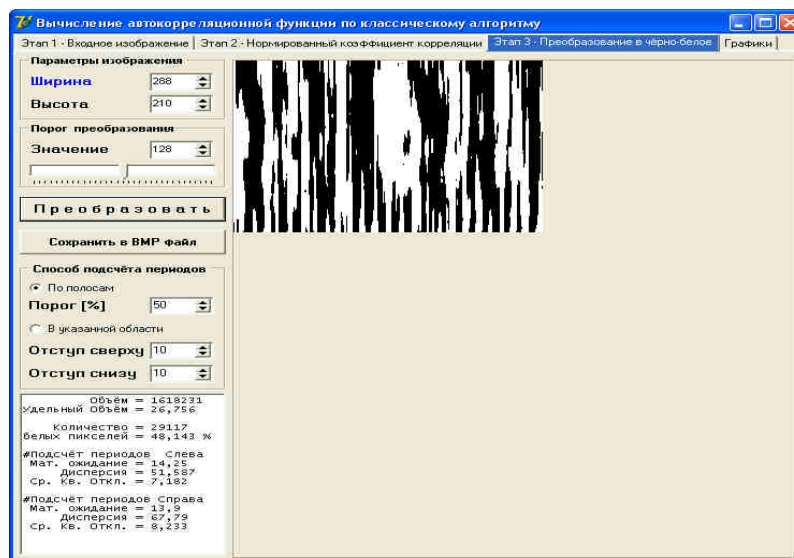


Рис.3.6. Интерфейс бинарных изображений корреляционных функций и таблица расчетных значений параметров

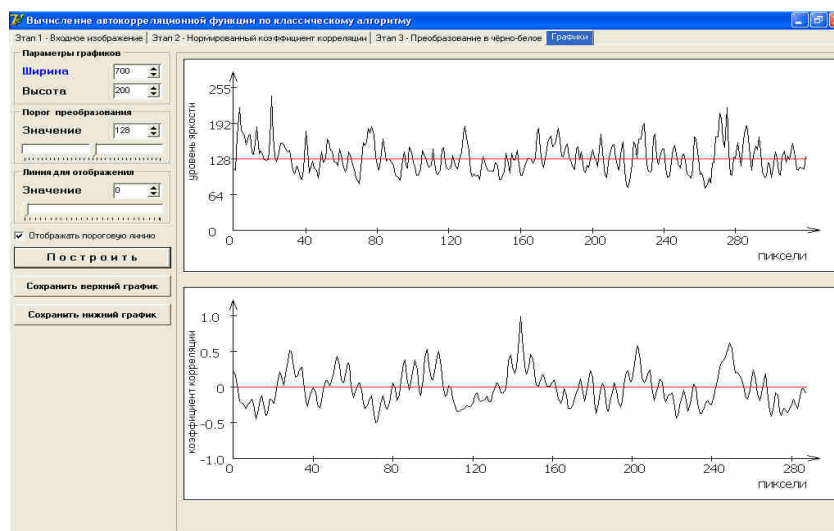


Рис.3.7. Интерфейс графиков изменения уровня яркости по строкам видеок кадров исследуемого изображения и нормированного коэффициента корреляции

Рассматриваемый метод исследований предусматривал также и получение графиков для видеосигнала по строкам исходного изображения и для коэффициента корреляции. Внешний вид интерфейса для данного этапа исследований имеет вид, приведённый на рис.3.7.

3.2. Идентификация геометрических параметров поверхности, полученных оптико-электронным методом

Вычисления корреляционной функции по рассмотренному методу были выполнены в специально разработанной компьютерной программе [3, 4], которая выводит на экран следующие параметры автокорреляционной функции: амплитуда автокорреляционной функции A_{cp} , среднеквадратическое отклонение автокорреляционной функции σ , математическое ожидание автокорреляционной функции M_{cp} , среднеквадратическое отклонение $M_{cp} - \sigma$, относительная опорная поверхность корреляционной функции T_{cp} в %. После обработки всего изображения в запоминающем устройстве сформирована матрица $M_1 \times M_2$ коэффициентов корреляции или двумерная корреляционная функция. Для номинального светового потока были выполнены исследования влияния формата эталона на величину корреляционных функций для поверхности колец, приведенных на рис.3.8.

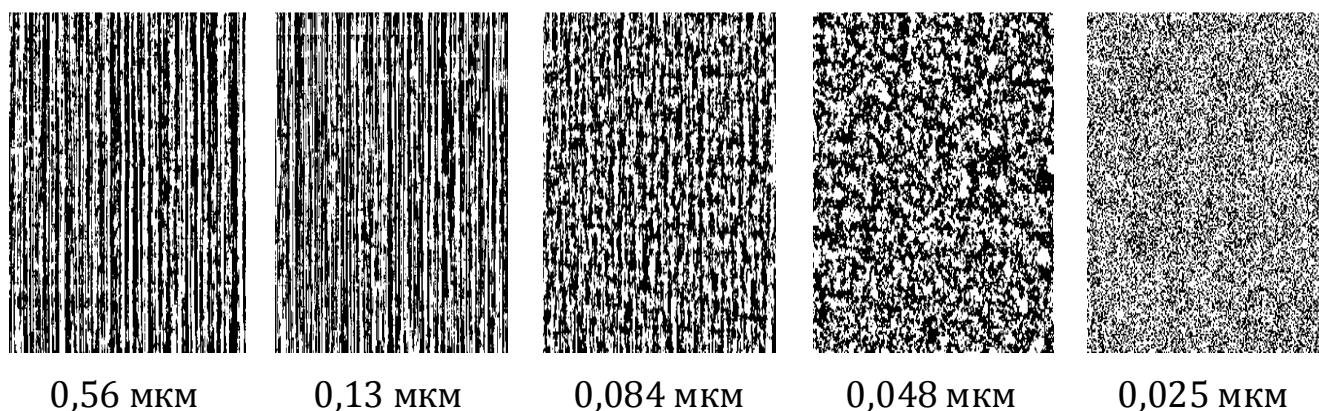


Рис.3.8. Бинарные изображения микрорельефа исследуемых колец подшипников (Ra , мкм)

Результаты исследований амплитуды автокорреляционной функции A_{cp} приведены в таблицах 3.2. и 3.3.

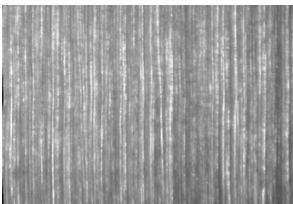
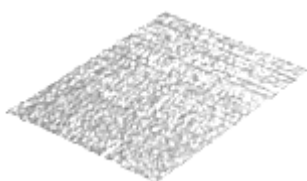
Таблица 3.2

Амплитуда A_{cp} и ее среднеквадратическое отклонение σ поверхности колец в зависимости от шероховатости поверхности

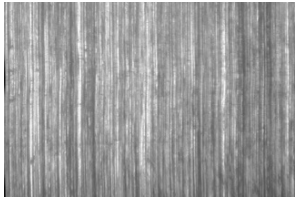
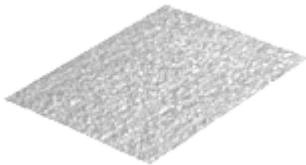
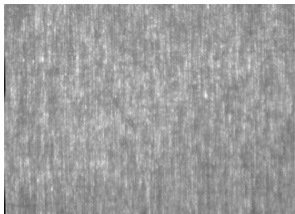
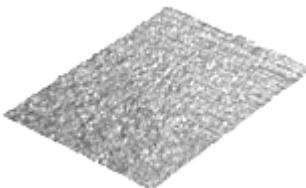
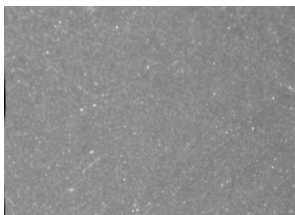
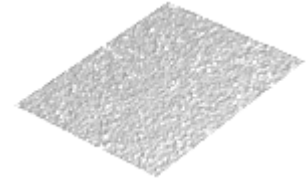
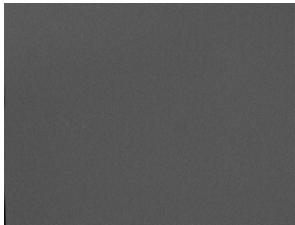
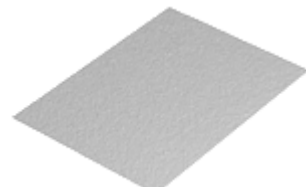
Шероховатость Ra , мкм	Размер эталона, пиксель		
	6 x 6	8 x 8	9 x 9
0,56	$A_{cp} = 35,8$ $\sigma = 1,8$	$A_{cp} = 25,1$ $\sigma = 1,8$	$A_{cp} = 20,0$ $\sigma = 1,7$
0,13	$A_{cp} = 30,1$ $\sigma = 1,4$	$A_{cp} = 20,9$ $\sigma = 1,2$	$A_{cp} = 15,1$ $\sigma = 1,1$
0,084	$A_{cp} = 29,9$ $\sigma = 1,2$	$A_{cp} = 15,0$ $\sigma = 1,1$	$A_{cp} = 10,0$ $\sigma = 1,1$
0,048	$A_{cp} = 25,6$ $\sigma = 1,3$	$A_{cp} = 13,6$ $\sigma = 1,4$	$A_{cp} = 8,8$ $\sigma = 1,2$
0,025	$A_{cp} = 24,8$ $\sigma = 1,4$	$A_{cp} = 11,8$ $\sigma = 1,4$	$A_{cp} = 6,4$ $\sigma = 1,2$

Таблица 3.3

3 – D изображения шлифованных поверхностей дорожек качения в развернутом виде при $\Phi_0 = 600 \cdot 10^{-3}$ лм

Видеоизображение	Ra , мкм	Формат 3 – D модели Поверхности	Амплитуда автокорреляционной функции
1	2	3	4
	0,56		$A_{cp} = 30,2$ $\sigma = 2,8$

Продолжение таблицы 3.3.

1	2	3	4
	0,13		$A_{cp} = 21,6$ $\sigma = 2,0$
	0,084		$A_{cp} = 13,4$ $\sigma = 0,7$
	0,048		$A_{cp} = 10,8$ $\sigma = 0,8$
	0,025		$A_{cp} = 6,8$ $\sigma = 0,07$

Анализ приведенных результатов показывает, что с уменьшением параметра шероховатости поверхности Ra амплитуды корреляционного сигнала снижается. Кроме этого, графики корреляционной функции также свидетельствует о том, что в этих образцах уменьшается регулярная компонента сигнала (см. рис. 3.9).

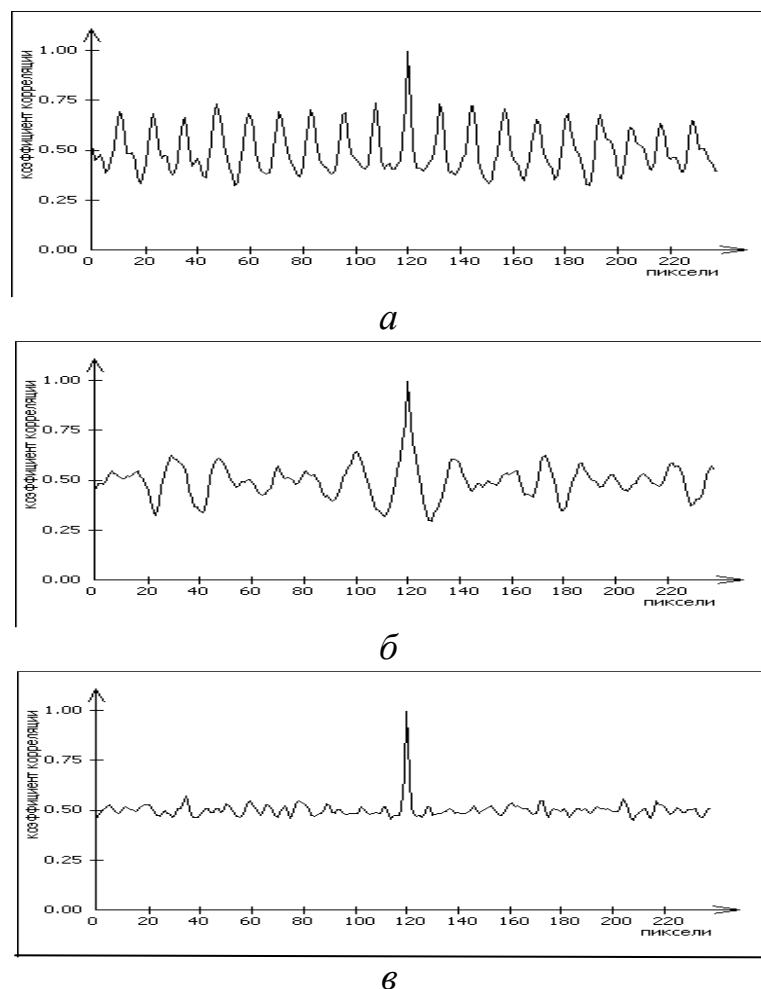


Рис.3.9. Графики изменения нормированных корреляционных сигналов поверхностей: *а* – $Ra = 0,56$ мкм; *б* – $Ra = 0,13$ мкм; *в* – $Ra = 0,084$ мкм

Из приведенных зависимостей также видно, что с увеличением шероховатости увеличивается математическое ожидание или частота колебаний автокорреляционной функции и увеличивается доля регулярной составляющей. При этом для поверхности с наименьшей шероховатостью (см. рис.3.9 в) наблюдается резкое падение амплитуды корреляционного сигнала, что может также служить характерным признаком для идентификации (распознавания) изделий с заданными высокими показателями по качеству поверхности.

На рис.3.10 – 3.12 приведены тарировочные графики оценки шероховатости поверхности эталонных образцов в зависимости от амплитуды автокорреляционной функции и размеров базового окна. Анализ полученных

данных показал, что с увеличением шероховатости поверхности средняя амплитуда колебания автокорреляционной функции A_{cp} повышается. Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости, связывающие амплитуду автокорреляционной функции и параметры шероховатости поверхности образца. В качестве эталонов сравнения выбраны образцы шероховатости, выполненные в соответствии с ГОСТ 9378 – 93 [19].

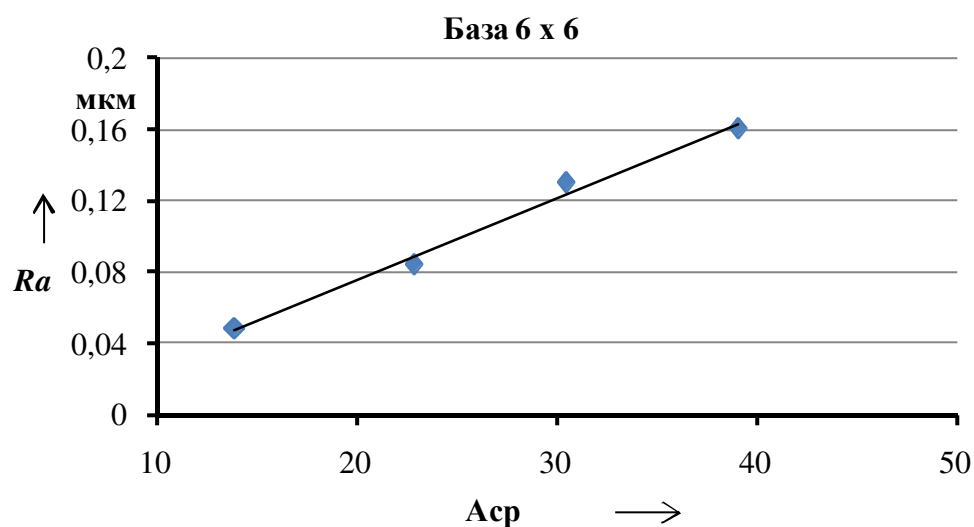


Рис.3.10. Тарировочный график для базового окна эталона размером 6 × 6

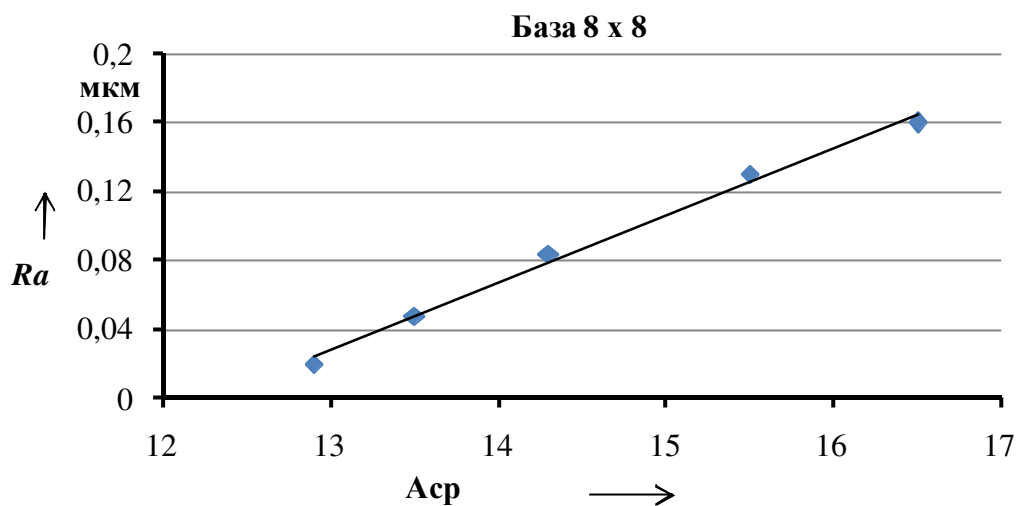


Рис.3.11. Тарировочный график для базового окна эталона размером 8 × 8

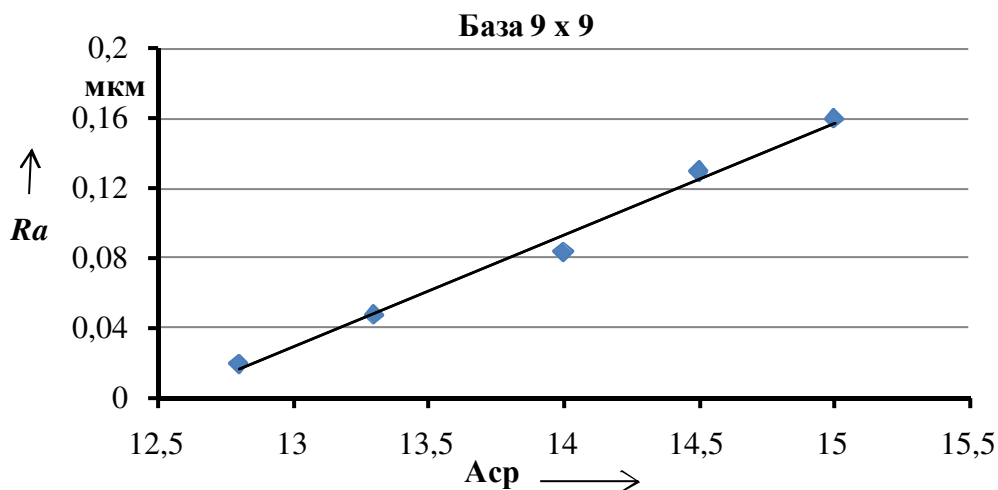


Рис.3.12. Тарировочный график для базового окна эталона размером 9×9

Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,98$ влияния амплитуды автокорреляционной функции (X) на шероховатость поверхности (y) в зависимости от размера базового окна эталона:

$$(6 \times 6) - y = 0,0046 \cdot X - 0,0164;$$

$$(8 \times 8) - y = 0,0391 \cdot X - 0,4794;$$

$$(9 \times 9) - y = 0,0644 \cdot X - 0,8082.$$

Получены регрессионные уравнения идентификации микрогеометрии поверхности прецизионных деталей подшипника (дорожек качения внутренних колец) на основе вычисления номинальных значений параметров шероховатости поверхности Ra , Rz , $Rmax$ в зависимости от средней амплитуды автокорреляционной функции, вычисленной по изображению исследуемой поверхности. Для базового окна размером эталона **6 x 6** получены следующие аналитические зависимости:

$$Ra = 0,004 \times A_{cp} - 0,016, \text{ мкм},$$

$$Rz = 0,17 + 0,012 \times A_{cp}, \text{ мкм},$$

$$Rmax = 0,88 + 0,052 \times A_{cp}, \text{ мкм}. \quad (3.2)$$

Для базового окна размером эталона **8 x 8** получены следующие аналитические зависимости:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,0391 \cdot A_{cp} - 0,4794, \text{ мкм}, \\ Rz &= 0,16 + 0,045 \times A_{cp}, \text{ мкм}, \\ Rmax &= 0,84 + 0,056 \times A_{cp}, \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Для базового окна размером эталона **9 x 9**:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,0644 \cdot A_{cp} - 0,8082, \text{ мкм}, \\ Rz &= 0,14 + 0,07 \times A_{cp}, \text{ мкм}, \\ Rmax &= 0,82 + 0,08 \times A_{cp}, \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Анализ полученных данных показал, что с увеличением формата эталона от 6 x 6 до 9 x 9 пикселей разница в средней амплитуде переменной составляющей корреляционной функции A_{cp} для образцов с различной шероховатостью остаётся постоянной.

Таким образом, оптико-электронный комплекс позволяет определить среднюю амплитуду колебания автокорреляционной функции A_{cp} и рассчитать параметры шероховатости поверхности с использованием аналитических зависимостей (3.2), (3.3) и (3.4) вне зависимости от направления светового потока.

Для подтверждения полученных результатов были проведены исследования влияния направления рисок, полученных при шлифовании, на среднюю амплитуду переменной составляющей корреляционной функции A_{cp} , определенную оптико-электронным методом и параметры шероховатости поверхности эталона измеренной на профилометре модели 296 и рассчитанную по формуле 3.4. Эталон шероховатости поворачивался в процессе измерения на три разных угла: поперек направлению рисок – угол 0° , под углом 45° к направлению рисок, по направлению рисок – угол 90° . Микрогеометрия поверхностей эталона исследовалась оптико-электронным методом на следующих режимах: параметры сканирующего эталона 9 x 9 пикселей, угол наклона источника света 45° , угол поворота делительного стола 0, 45 и 90° . По-

лученные значения параметров шероховатости сравнивались с шероховатостью профиля поверхности.

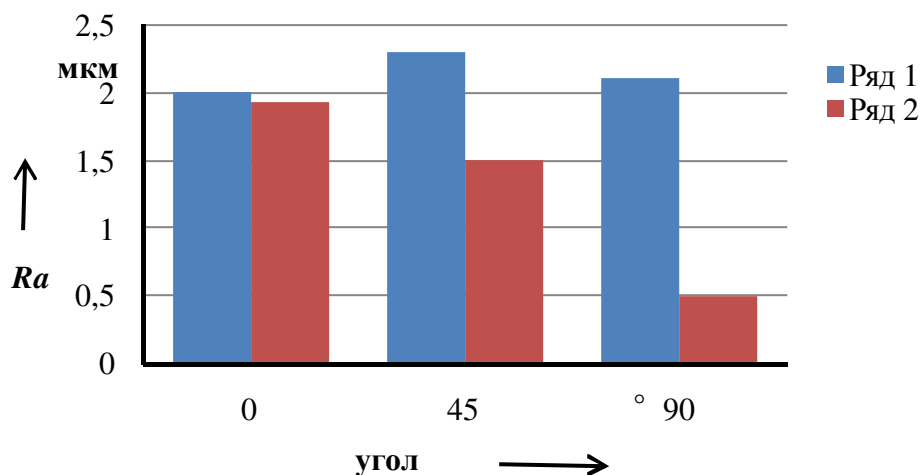


Рис.3.13. Сравнение параметра Ra шероховатости поверхности, определенного оптико-электронным методом (ряд 1) и по профиллограммам профиля поверхности (ряд 2)

Из приведенных данных видно, что шероховатость поверхности, рассчитанная по средней амплитуде переменной составляющей корреляционной функции A_{cp} , не зависит от угла поворота источника света и находится в пределах $Ra = 2,0 - 2,3$ мкм. При изменении положения иглы профиллографа относительно эталонного образца от 0° до 90° величина Ra изменяется в 4 раза от $Ra = 1,94$ мкм до $Ra = 0,5$ мкм. Это свидетельствует о том, что шероховатость поверхности, измеренная оптико-электронным комплексом, отличается от шероховатости профиля поверхности, определенной контактным методом, и имеет более стабильные параметры.

3.3. Анализ дефектов при профильном шлифовании

Наиболее сложной задачей является классификация и определение параметров дефектов, полученных при шлифовании. Контроль дефектов производился на микроскопах. Анализ технологии контроля дефектов внутренних

колец приборных подшипников после операций шлифования на ООО «ЗПП» показал, что оптические методы контроля не дают существенных результатов.

Дефекты поверхности дорожек качения колец подшипников исследовались с помощью оптико-электронного комплекса и методики, приведенной в разделе 3.1. Дефекты на поверхности появились как результат контактных взаимодействий абразивных зерен и отходов шлифования с поверхностью заготовки. Для оценки дефектов была принята степень относительной значимости дефектов, которая определялась по результатам их сравнения между собой по определенным признакам[10]. Авторы, предложили использовать метод расстановки приоритетов, основанный на коллективной экспертной оценке. Метод состоял из последовательных процедур, описанных ниже.

Пусть имеется на поверхности дорожки качения подшипника дефект – X , образование которого происходит под влиянием Y – факторов, по которым эти объекты будут сравниваться.

Величина относительной значимости (или приоритета по i -му признаку) каждого объекта в общей сумме определяются методом итерации первого уровня [10]:

$$K_i = \frac{Z_i}{\sum B_{ij}} \cdot 100\%, \quad (3.5)$$

где Z_i – значение приоритета объекта по конкретному признаку, B_{ij} – коэффициент, являющийся аналогом представления о превосходстве i -го объекта над j -м.

Каждый такой элемент K_i означает относительное число приоритетов данного дефекта. Найденные K_i и будут параметрами дефектов.

Экспериментальные исследования показали, что основные факторы, влияющие на образование дефектов при шлифовании следующие: скорость вращения заготовки, м/мин (1); поперечная черновая подача, мм/мин (2); по-

перечная чистовая подача, мм/мин (3); выхаживание, с (4); поперечная подача при правке, мм/дв. ход (5); марка СОЖ (6); чистота СОЖ (7).

Исследования микрогеометрии поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников на оптико-электронном комплексе осуществлялось при следующих режимах: формат кадра 120 x 140 пк, базовое окно размером эталона 9 x 9 пк, угол наклона источника света 45°, по длине дуги кольца снималось 10 кадров и если на одном изображении обнаруживались дефекты, кольцо считалось в целом бракованным. Таким образом, из 500 колец, прошедших исследование, типичные дефекты представлены на 27 кольцах (рис.3.14).

По результатам проведенных исследований были выделены следующие признаки дефектов на рабочей поверхности дорожки качения колец подшипников: 1 – вкрапление осколков зерен в поверхность (фото № 1, 17 рис.3.14); 2 – наплыв (фото № 15, 22); 3 – несплошности (фото № 25); 4 – микропроточины (фото № 8, 11); 5 – налипание обрабатываемого материала (стружки) на поверхность (фото № 3, 7); 6 – пропахивание (фото № 10, 13); 7 – лунка (фото № 1, 4, 16); 8 – выкрашивание (фото № 2, 6, 18); 9 – локальные разрушения (фото № 26).

Глубина дефекта определялись по разнице параметров A_{cp} поверхности, полученных при наличии дефекта (A_{cpi}) и без него (A_{cpj}) $\Delta A_{cp} = A_{cpi} - A_{cpj}$. Полученное значение подставлялось в формулу для расчета глубины риски $Rz_0 = 0,14 + 0,07 \times \Delta A_{cp}$, мкм. Например, при шлифовании на поверхности появился дефект, который повлиял на величину $A_{cpi} = 14,0$, а $A_{cpj} = 13,4$, тогда глубина дефекта $Rz_0 = 0,182$ мкм, при $Ra = 0,058$ мкм.

Из приведенных данных видно, что наиболее значимыми факторами, влияющими на образование дефектов, являются факторы 2, 5, 6, 7, т.е. поперечная подача при правке ШК, поперечная черновая подача при шлифовании, вид и качества очистки СОЖ.

Результаты определения величины относительной значимости $K_i, \%$

Дефекты	Факторы							$K_j, \%$
	1	2	3	4	5	6	7	
1	+	+			+		+	4,9
2				+		+	+	3,7
3						+	+	2,5
4	+	+			+	+	+	6,2
5						+	+	2,5
6		+			+		+	3,7
7		+			+		+	3,7
8	+	+	+		+		+	6,2
9		+	+	+		+	+	6,2
$K_i, \%$	3,7	7,4	2,5	2,5	6,2	6,2	11,1	39,6

По результатам проведенных исследований дефектов поверхности дорожек качения внутренних колец подшипников при профильном шлифовании с применением масляной СОЖ были выделены следующие причины:

Причина 1. Дефекты в виде следов (вмятин) от внедрения абразивных зерен на рабочей поверхности дорожки качения связаны с тем, что в процессе шлифования не выполняются технологические режимы обработки, в частности отсутствует выхаживание, или недостаточна длительность этого процесса.

Причина 2. Возникновение дефектов в виде царапин связано с некачественной очисткой СОЖ. Частицы абразива после попадания с СОЖ в зону резания мгновенно закрепляется между поверхностью круга и заготовки и производят работу резания до тех пор, пока силы резания не раздавят осколок зерна, образуя в конце движения вмятину.

Причина 3. Дефекты, в виде сгустков стружки свидетельствуют о некачественной магнитной сепарации СОЖ.

Причина 4. Дефекты, расположенные по краям поверхности дорожки качения, связаны с воздействием свободного абразива, находящегося в СОЖ, на поверхность дорожки качения подшипников.

Выводы:

1. Оценка микрогеометрии поверхности оптико-электронным комплексом, показала, что наиболее информативным параметром является амплитуда автокорреляционной функции. Предложены зависимости связывающие величину Ra , R_{max} , Rz и амплитуду автокорреляционной функции.
2. Применение оптико-электронного комплекса для исследования дефектов дорожек качения колец подшипников позволило выявить дефекты, нефиксирующиеся контактными методами измерения.
3. Предложен анализ дефектов по величине относительной значимости и выявлены причины их возникновения.
4. Установлено, что дефекты образуются в результате некачественной очистки масляной СОЖ.
5. Необходимо разработать технологию бездефектного шлифования дорожки качения внутренних колец подшипников.

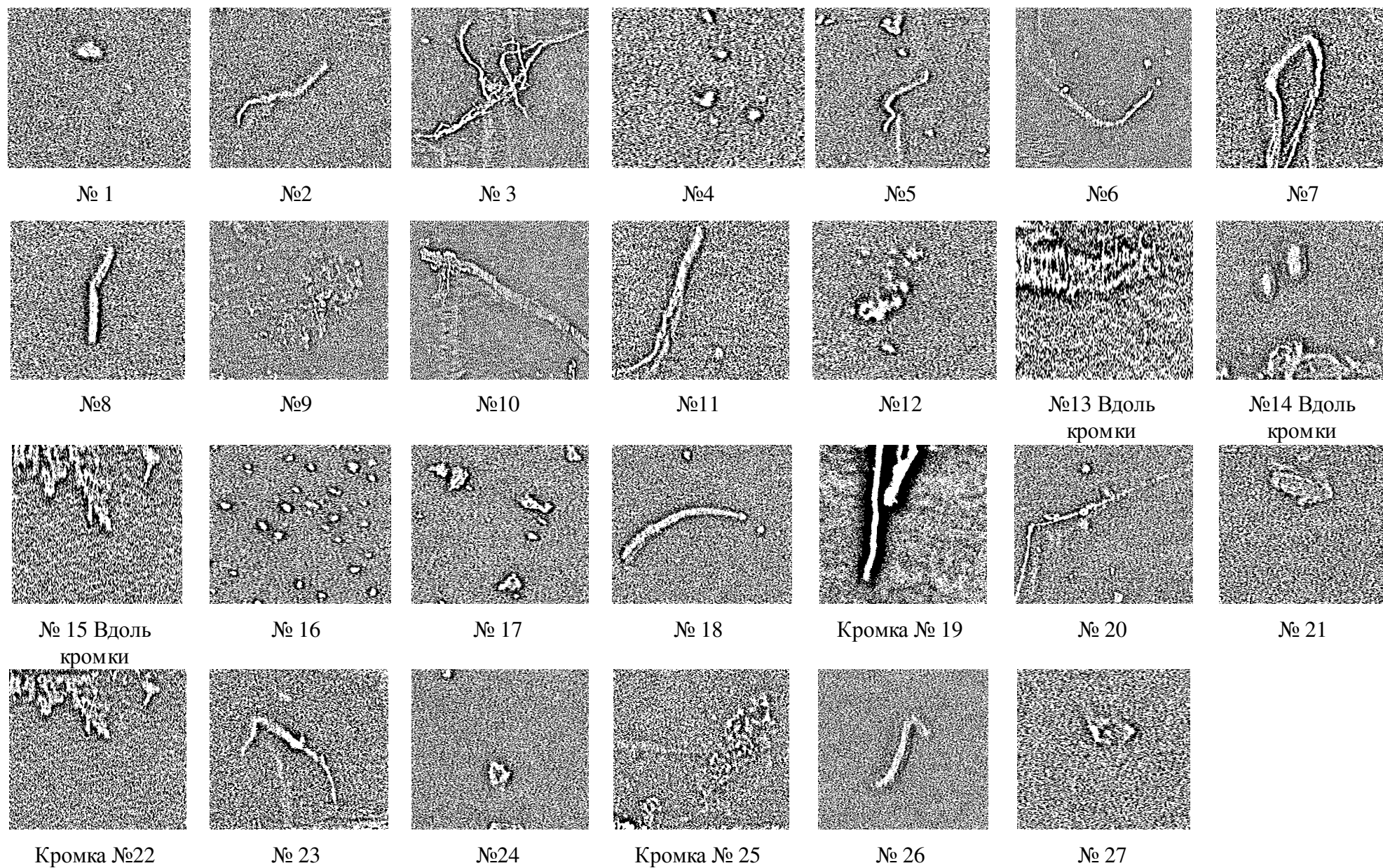


Рис.3.14. Дефекты на поверхности дорожки качения колец подшипников после шлифования

Глава 4. Исследование процесса бесцентрового профильного шлифования дорожек качения колец приборных подшипников на жестких опорах

4.1. Методика экспериментальных исследований

Методика экспериментальных исследований включала следующие разделы:

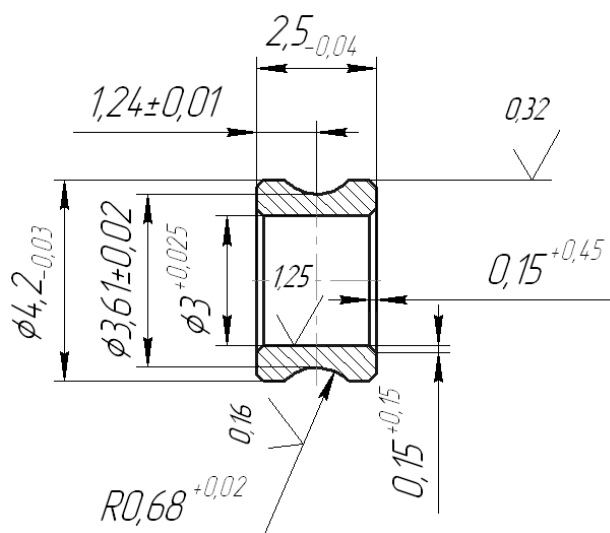
1. Технические требования и технология обработки колец приборных подшипников на ООО «ЗПП»;
2. Методика экспериментальных исследований производительности процесса;
3. Методика определения геометрических параметров дорожек качения колец подшипников;
4. Методика исследования качества СОЖ.

4.1.1. Технические требования и технология обработки колец приборных подшипников на ООО «ЗПП»

Технология обработки дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника 2000083S (см. рис.4.1), применяемая в исследованиях, соответствовала технологической операционной карте, разработанной на заводе ООО «ЗПП».

Материал внутреннего кольца подшипника № 2000083S – сталь ШХ15, твердость составляла HRC 62 – 65, геометрические параметры дорожки качения внутренних колец подшипников, контролируемые после операций шлифования, приведены в таблице 4.2.

Химический состав в % стали ШХ 15



Геометрические параметры поверхности, контролируемые после операций шлифования

Технология окончательной обработки дорожки качения внутреннего кольца подшипника 2000083S проводилась на станке для бесцентрового шлифования на жестких опорах Брайант М – 1 и состояла из следующих операций и переходов:

Операция 450. Профильное шлифование дорожки качения.

П 1. Черновое шлифование. Режимы обработки: $n_3 = 640 - 780$ об/мин, $V_3 = 8,4 - 10,3$ м/мин, $n_k = 1750 - 1850$ об/мин, $V_k = 25,6 - 34,4$ м/с, $S_{\text{черн}} = 0,9$ мм/мин, $t_{\text{черн}} = 0,248$ мм, $T_{\text{м черн}} = 22$ с.

П 2. Чистовое шлифование. Режимы обработки: $n_3 = 640 - 780$ об/мин, $V_3 = 8,4 - 10,3$ м/мин, $n_k = 1750 - 1850$ об/мин, $V_k = 25,6 - 34,4$ м/сек, $S_{\text{чист}} = 0,2$ мм/мин, $t_{\text{чист}} = 0,02$ мм, $T_{\text{м чист}} = 6$ с.

П 3. Выхаживание. Режимы обработки: $n_3 = 640 - 780$ об/мин, $V_3 = 8,4 - 10,3$ м/мин, $n_k = 1750 - 1850$ об/мин, $V_k = 25,6 - 34,4$ м/сек, $T_{\text{м чист}} = 5$ с.

Операция 455. Размагничивание.

Операция 460. Промывка в ваннах, 43М – СК.

Операция 465. Промывка на УЗМ – СК.

Операция 470. Дополнительный воздушный отпуск по ОТК.

Операция 495. Контроль ОТК (на соответствие технологическим условиям выполненных операций черного и чистового шлифования, наличие прижогов).

Операция 500. Полирование дорожки качения.

Оборудование – ЭПШ. Режимы обработки: $n_3 = 6000...9000$ об/мин, $V_{\text{д.}} = 68...102$ м/мин, припуск 0,010 мм; инструмент: полирующий материал: паста АС – М40/28, основа – жгут из хлопчатобумажных ниток.

Операция 505. Размагничивание. Промывка в ваннах, 43М – СК.

Операция 510. Окончательный контроль (по дефектам).

4.1.2. Методика экспериментальных исследований производительности процесса

В ходе экспериментальных исследований проводилась настройка станка Брайант М – 1 и положение жестких опор: угол между опорами составлял $\beta = 105^\circ$, а угол положения регулируемой опоры относительно горизонтальной оси кольца α составлял 7° (по данным теоретических исследований оптимальный угол $\alpha = 5^\circ - 10^\circ$), при исследовании отклонения от круглости величина α изменялась от 5° до 20° . Координаты смещения центра вращения кольца относительно центра вращения планшайбы составили $\Delta x = 0,2$ мм, $\Delta y = 0,3$ мм.

Применялся шлифовальный круг 1–355x16x127 91A F320 М 9 V2, в процессе шлифования ШК периодически правился. Практика показала, что период правки составлял 20 – 30 деталей. Предел износа ШК – 280x16x127. Правка осуществлялась алмазным карандашом Ц2 с режимами: $V_k = 25,6 - 34,4$ м/сек, $S_{\text{поп}} = 0,2$ мм/ход, $S_{\text{чист}} = 15$ мм/мин. Процесс осуществляется с постоянной подачей СОЖ в зону обработки.

Режимы шлифования изменялись в следующих пределах:

Скорость шлифования была постоянной $V_k = 25,6 - 34,4$ м/сек,

Окружная скорость вращения детали определялась по формуле $V_3 = 60 V_k / q$, где $q = 60 - 100$ по данным [106]. В технологических картах на заводе $V_3 = 8,4 - 10,3$ м/мин. Для проведения исследований по расчетным режимам $V_3 = 34 - 20,4$ м/мин были изготовлены шкивы, которые позволили повысить скорость вращения детали.

Поперечная подача при черновом шлифовании изменялась от $S_{\text{черн}} = 0,4 - 0,9$ мм/мин, при чистовом шлифовании $S_{\text{чист}} = 0,2 - 0,4$ мм/мин.

Выхаживание – это обработка без поперечной подачи определялась периодом времени и колебалось от $T_m = 2$ с до $T_m = 5$ с.

Обработка полученных данных о шероховатости профиля поверхности дорожки качения внутренних колец приборных подшипников при бесцентровом шлифовании на жестких опорах осуществлялась статистическим методом, основанным на теории вероятности и математической статистике, позволяющим установить погрешность с вероятностью 0,9.

Микрогеометрия поверхности дорожек качения внутренних колец приборных подшипников исследовалась на оптико-электронном комплексе, что позволило получить уникальные результаты по идентификации параметров шероховатости профиля поверхности по ГОСТ 2789 – 73 [18] и параметров шероховатости поверхности, определенных оптико-электронным методом. Методика исследования подробно описана в главе 3.

Геометрические параметры дорожки качения колец подшипников исследовалась по выборочной совокупности обработанных колец, которая отбиралась из генеральной совокупности (общей партии) для получения достоверных сведений о всей генеральной совокупности. Исследования гранности, волнистости, отклонения от профиля, шероховатости и отклонения от круглости проводились выборочно за период между правками шлифовального круга через каждые пять обработанных колец (1-5-10-15-20-25-30 деталь).

На рис.4.3 показан кругломер модели *Talyrond 30* – PC для измерения отклонение от круглости.



Рис.4.3. Измерение внутренних колец подшипников на кругломере модели *Talyrond 30-PC*

По данным ООО «ЗПП» количество брака по дефектам дорожки качения составило около 5 %. Для устранения недостатков существующего процесса необходимо обеспечить требуемую точность и качество обрабатываемой поверхности и повысить производительность операций шлифования, установить и обосновать оптимальные условия и режимы данного процесса.

4.1.4 Методика исследования качества СОЖ

Исследование процесса шлифования проводилось с СОЖ следующих составов: масляная СОЖ (масло индустриальное ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%), водная СОЖ (3% – ная эмульсия АРС – 21М, дистиллированную воду).

Эффективность очистки СОЖ определялась при врезном кругом наружном шлифовании внутренних колец подшипников. В работе предложено использовать при шлифовании дорожки качения приборных подшипников модельную установку по очистке водной СОЖ, состоящую из трех очистителей (рис.4.4) [12, 13].

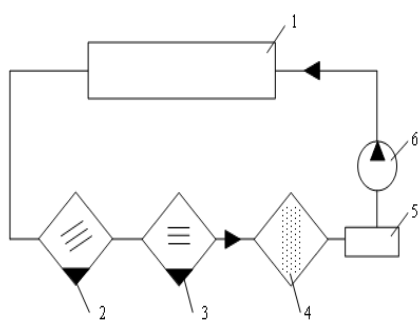


Рис.4.4. Технологическая схема модельной установки по очистке водной СОЖ от механических жидкостных примесей:

1 – шлифовальный станок; 2 – тонкослойный гравитационный очиститель (1 ступень); 3 – тонкослойный гравитационный очиститель (2 ступень); 4 – фильтр с загрузкой из кварца (3 ступень); 5 – емкость очищенной СОЖ; 6 – насос

Установка по очистке СОЖ от механических жидкостных примесей, применяемая в исследовании, состояла из 3 ступеней: 1 ступень – тонкослойный гравитационный очиститель, скорость движения СОЖ – 0,006 м/с, площадь рабочего проема $S = 0,038 \text{ м}^2$, 2 ступень – тонкослойный гравитаци-

онный очиститель, скорость движения СОЖ – 0,003 м/с, площадь рабочего проема $S = 0,075 \text{ м}^2$, 3 ступень – фильтр с загрузкой из кварца. Производительность установки по очистке водной СОЖ составила $Q = 13 \text{ л/мин}$.

Принцип действия осадительно-фильтровальной установки:

1) На первой ступени в зазоре между осадительными пластинами происходило осаждение в основном крупных абразивных частиц (именно они в первую очередь выпадают из СОЖ), а также части крупных металлических примесей – агрегатов и комков. Металлические частицы представляли собой сливную микростружку и отдельные фрагменты;

2) На второй ступени вследствие снижения скорости движения СОЖ в 2 раза обеспечивалось достаточно полное выпадение в осадок комков и отдельных микростружек, частично пропускались главным образом отдельные микростружки и их фрагменты, а также тонкие осколки абразивных зерен ($d_{\text{стр}} \leq 50 \text{ мкм}$);

3) На третьей ступени на поверхность песка выделялись посторонние масла, а также продукты разложения СОЖ в зонах резания (продукты термопиролиза). В результате в массе кварцевого песка накапливалась масса жидкого маслянистого продукта, загрязненного механическими примесями.

На рисунке 4.5 (а) показана установка для очистки масляной СОЖ, которая используется на заводе и установка по очистке водной СОЖ (б).



а



б

Рис.4.5. Установки для очистки масляной (а) и водной (б) СОЖ

В ГОСТ Р 50558 приведены следующие критерии эффективности очистки СОЖ от механических примесей и их предельные показатели при круглом наружном шлифовании:

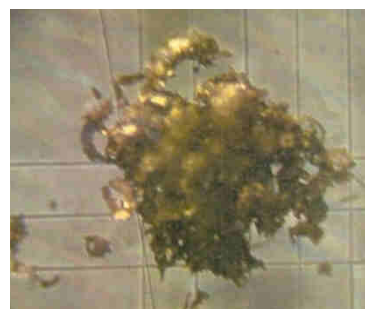
1. Остаточная концентрация механических примесей в СОЖ C_o , г/л, для черновых режимов $C_o = 0,4$ г/л, для чистовых $C_o = 0,1$ г/л;
2. Степень очистки ε , позволяющая оценить относительное удаление частиц механических примесей из СОЖ: $\varepsilon = 1 - \frac{C_o}{C_{и}}$, для черновых режимов $\varepsilon = 0,99$, для чистовых $\varepsilon = 0,995$;
3. Средний размер частиц механических примесей в СОЖ d_u , мкм: для черновых режимов $d_u = 30$ мкм, для чистовых $d_u = 5$ мкм.

Проведены исследования качества очистки масляной и водной СОЖ и эффективность работы установок.

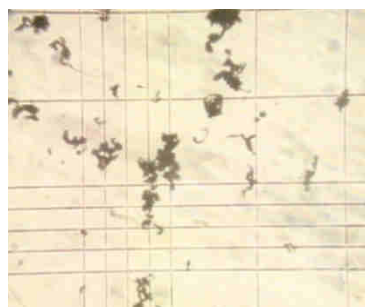
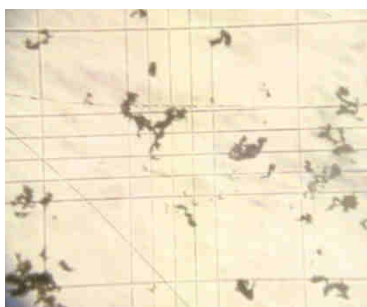
В результате исследования установлено, что в состав масляной СОЖ после шлифования входят: абразивные частицы (цельные зерна, выкрашивающиеся во время правки, и осколки зерен); металлическая микростружка и комки из нее; фрагменты стружки.

Концентрация частиц механических примесей после черновой и чистовой обработки на входе в установку по очистке масляной СОЖ составила 0,6...0,8 г/л, что соответствует достаточно интенсивному процессу шлифования. Размер (диаметр) d_u средней эквивалентной частицы механических примесей оседающей со скоростью реальной частицы, до очистки СОЖ составлял 45...50 мкм (рис.4.6).

Концентрация частиц механических примесей в очищенной масляной СОЖ не превышала 0,15...0,16 г/л. Величина степени очистки при исследованиях составила $\varepsilon = 0,97...0,98$. Размер (диаметр) d_u средней частицы после очистки составлял 10...15 мкм.



a)



б)

Рис.4.6. Микрофотографии проб масляной неочищенной (*а*) и очищенной (*б*) СОЖ (комки из сливной микростружки и отдельные фрагменты)

Таким образом, было установлено, что система по очистке масляных СОЖ не удовлетворяет техническим стандартам, а модернизация системы по очистке масляных СОЖ потребовала бы значительных материальных затрат.

Микрофотографии проб очищенной водной СОЖ представлены на рис.4.7.

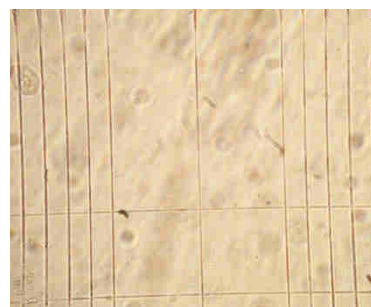
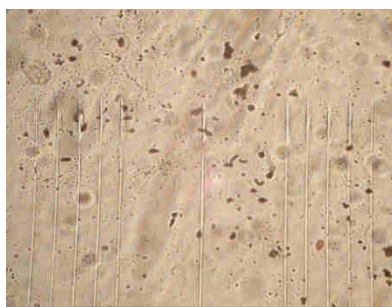


Рис.4.7. Микрофотографии проб очищенной водной СОЖ (фрагменты абразивных частиц)

При исследовании процесса бесцентрового шлифования дорожек качения колец подшипников с водной СОЖ было обработано 900 колец (3

смены работы станка). Пробы отбирались до очистки и после очистки водной СОЖ.

Данная установка обеспечила эффективную очистку водной СОЖ от крупных абразивных частиц, микростружки и комков (путанки) из нее, а также от крупных фрагментов микростружки, и очищенная СОЖ соответствовала принятым стандартам.

Процесс удаления побочных продуктов очистки (механических и жидкостных примесей) производился вручную путем разборки очистителей и их промывки.

В результате испытаний установлено:

1. В состав загрязненной водной СОЖ входят: абразивные частицы (цельные зерна, выкрашивающиеся во время правки круга, и осколки зерен); металлическая микростружка и комки из нее; фрагменты стружки.

2. Концентрация частиц механических примесей в очищенной СОЖ не превышала 0,05...0,06 г/л. Величина степени очистки СОЖ при испытаниях составила $\varepsilon = 0,995$. Размер (диаметр) $d_{\text{н}}$ средней эквивалентной частицы механических примесей, оседающей со скоростью реальной частицы, до очистки СОЖ составлял 45...50 мкм.

3. Размер (диаметр) d_0 средней частицы после очистки составлял 5 мкм. Остаточная концентрация жидкостных примесей в СОЖ в результате эксплуатации не превышала 1 %.

Исследования показали, что после шлифования колец с водной СОЖ, количество дефектов на дорожке качения уменьшилось и составило 1...1,5 % (рис.4.8). Дефекты по своей форме и конфигурации аналогичны дефектам, полученным при шлифовании с масляной СОЖ, однако их глубина значительно меньше, и встречаются у меньшего количества колец.

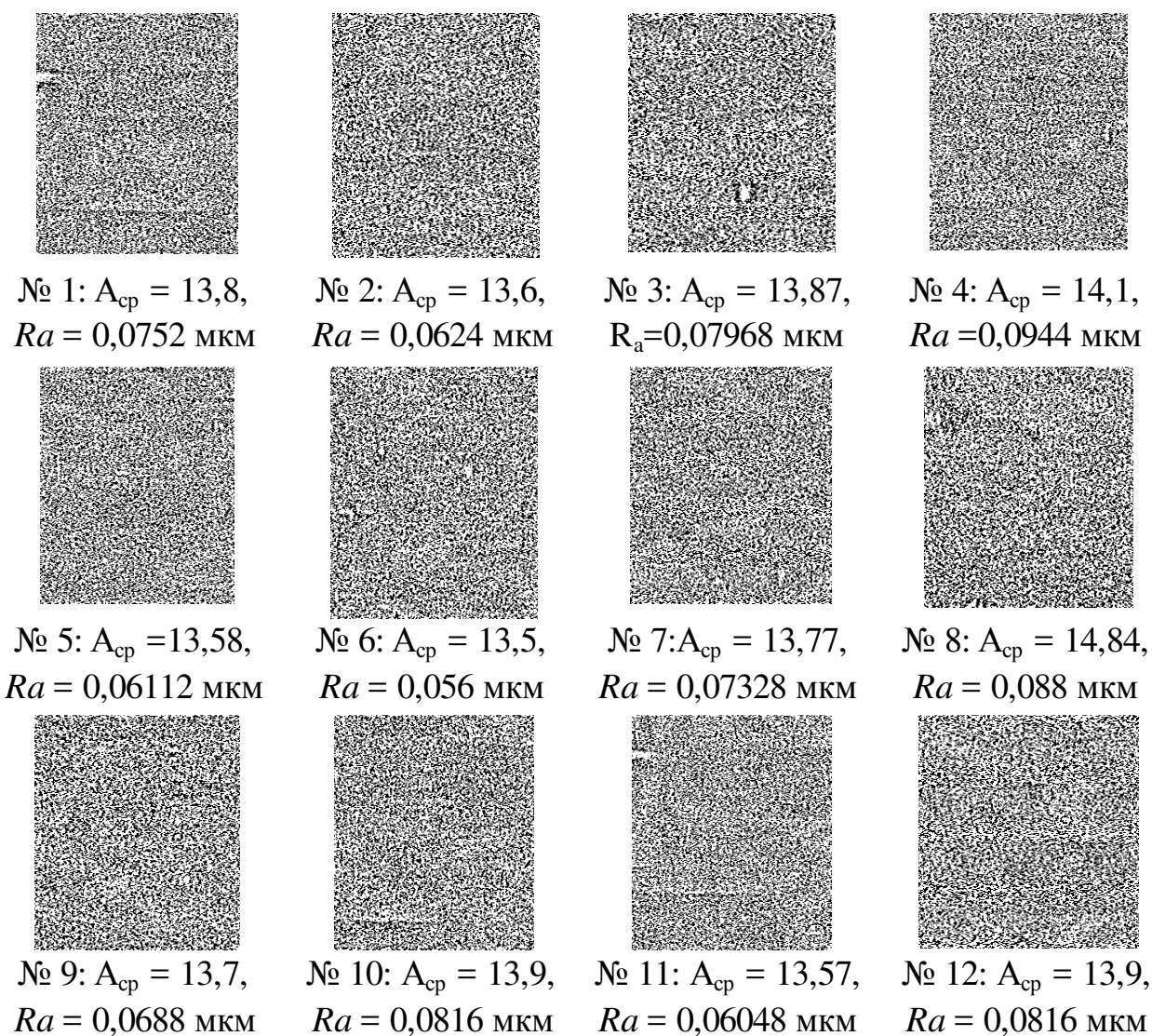


Рис.4.8. Дефекты на поверхности дорожки качения после шлифования с водной СОЖ

4.2. Исследование влияния СОЖ на качество поверхности дорожки качения колец приборных подшипников

Проведены сравнительные исследования параметров качества поверхности после бесцентрового шлифования колец подшипников с применением различных СОЖ – масляной и водной.

В качестве образцов применялись внутренние кольца приборных подшипников № 2000083S. Режимы шлифования соответствовали процессам черновой и чистовой обработки. После обработки определялись следующие гео-

метрические параметры поверхности дорожки качения: отклонение от профиля, шероховатость в поперечном направлении, волнистость и гранность дорожки качения, отклонение от круглости, прижоги и дефекты на рабочей поверхности кольца.

На рис.4.9 приведены результаты исследования отклонения от профиля дорожки качения внутреннего кольца подшипника после бесцентрового шлифования с применением различной по составу СОЖ.

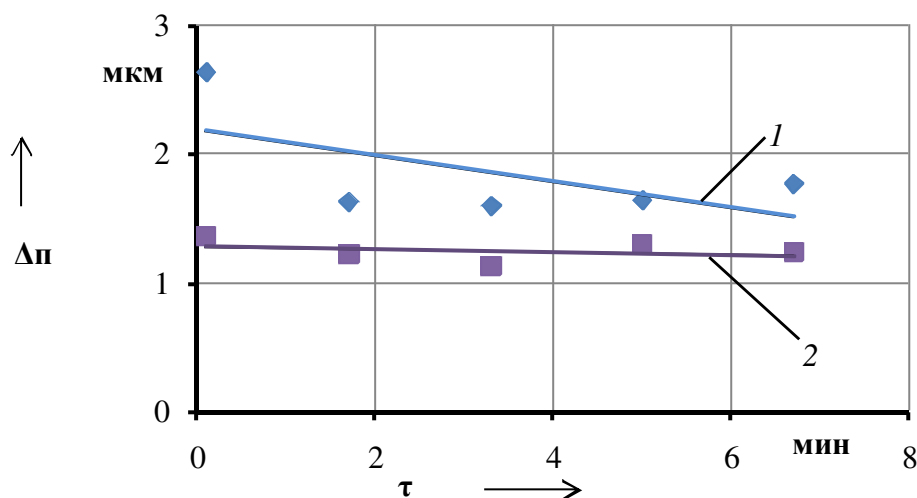


Рис.4.9. Сравнение результатов исследования отклонения от профиля дорожки качения при шлифовании с различной СОЖ за период между правками: материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол $\beta = 105^\circ$; угол $\alpha = 5^\circ \div 10^\circ$; $V_k = 34,4$ м/с; $V_{черн} = 40$ м/мин; $V_{чист} = 33$ м/мин; $S_{черн} = 0,9$ мм/мин; $S_{чист} = 0,2$ мм/мин; круг 1–355 х 8х 200 91A 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 APC – 21M)

Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,95$ влияния масляной СОЖ на величину отклонения от профиля дорожки (y) качения колец за период между правками ШК (x): $y = - 0,1023x + 2,1951$ и регресси-

онные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,98$ влияния водной СОЖ на величину отклонения от профиля дорожки качения колец за период между правками ШК (x): $y = - 0,01x + 1,2789$.

Исследованиями установлено, что при шлифовании с масляной СОЖ погрешность профиля дорожки качения внутренних колец составила от 1,5 до 2,7 мкм. При шлифовании дорожек качения с водной СОЖ данный параметр изменялся незначительно и находился в пределах 1,1 – 1,4 мкм (см. приложение 2). Это связано с тем, что основной припуск снимается на черновом переходе. Производительность обработки дорожки качения с водной СОЖ выше, поэтому за цикл обработки абразивный инструмент снимает требуемый припуск. В случае обработки масляной СОЖ производился неравномерный съём припуска, который необходимо дорабатывать на последующих технологических переходах. При шлифовании профиля дорожки качения водными растворами СОЖ, повышается эффективность работы абразивного зерна за счет увеличения толщины снимаемого единичным зерном слоя.

Проведены исследования влияния времени работы абразивного инструмента за период правки (20 колец) на поперечную шероховатость поверхности дорожки качения (рис.4.10). Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,92$ влияния масляной СОЖ на величину шероховатости поверхности R_z (y) дорожки качения колец за период между правками ШК (x): $y = - 0,0633x + 0,8662$ и регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,95$ влияния водной СОЖ на величину шероховатости поверхности R_z (y) дорожки качения колец за период между правками ШК (x): $y = - 0,0063x + 1,7137$.

Из приведенных данных видно, что при шлифовании с масляной СОЖ шероховатость имеет большой разброс значений (рис.4.10). В начальный период работы круга шероховатость составила $R_z = 1,1...1,2$ мкм, в последующем, когда на зернах появлялись площадки износа величина шерохова-

тости стабилизировалась в диапазоне $Rz = 0,45 - 0,6$ мкм. При шлифовании с водной СОЖ шероховатость поверхности повышается незначительно по сравнению с обработкой масляной СОЖ и достигает $Rz = 0,62 - 0,7$ мкм при допустимом значении $Rz = 0,8$ мкм, что говорит о большей стабильности процесса и о равномерном износе рабочей поверхности инструмента.

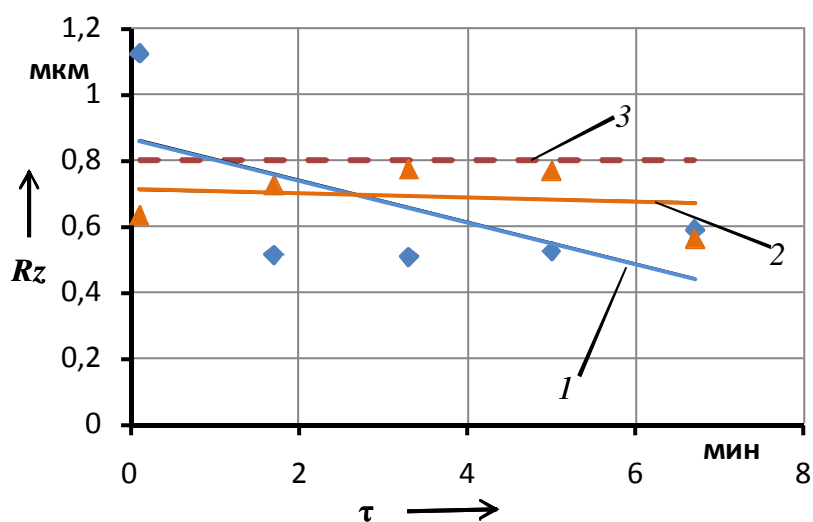


Рис.4.10. Сравнение результатов исследования шероховатости поверхности дорожки качения при шлифовании за период между правками:
 1 – с применением масляной СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%); 2 – с применением водной СОЖ (3% – ная эмульсия APC – 21M); 3 – максимально допустимое значение Rz по технологическому процессу (условия эксперимента см. рис.4.9)

В приложении 3 показаны типичные профилограммы поверхности дорожки качения. На профилограммах, полученных при обработке с масляной СОЖ, шероховатость низкая, однако имеются единичные глубокие риски или дефекты поверхности.

Волнистость и гранность дорожек качения колец подшипников исследовались по полученным круглограммам. Типичные круглограммы приведены в приложении 3. Исследования показали, что высота гранности и волнистости практически не зависят от состава СОЖ, т.к. связаны с автоколе-

баниями технологической системы – станок, приспособление, инструмент (рис.4.11; 4.12).

Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,95$ влияния масляной СОЖ на высоту волнистости (y) профиля дорожки качения колес за период между правками ШК (x): $y = - 0,0005x + 0,4394$ и регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,91$ влияния водной СОЖ на высоту волнистости (y) профиля дорожки качения колес за период между правками ШК (x): $y = - 0,0002x + 0,5287$, а также регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,95$ влияния масляной СОЖ на высоту гранности (y) профиля дорожки качения колес за период между правками ШК (x): $y = - 0,0033x + 0,6678$ и регрессионные зависимости с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,93$ влияния водной СОЖ на высоту гранности (y) профиля дорожки качения колес за период между правками ШК (x): $y = - 0,0039x + 0,8213$.

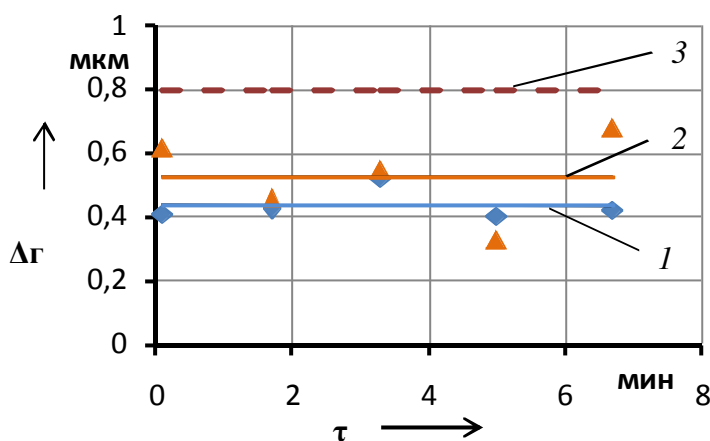


Рис.4.11. Исследование гранности при шлифовании дорожки качения за период между правками: 1 – с применением масляной СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%); 2 – с применением водоземulsionной СОЖ (3% – ная эмульсия APC – 21M); 3 – максимально допустимое значение высоты гранности по ТП (условия эксперимента смотри рис.4.9)

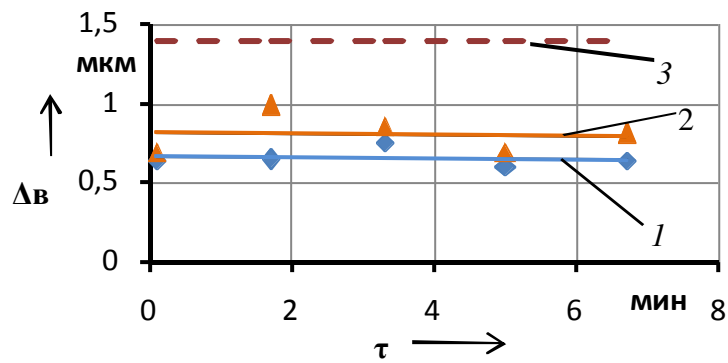


Рис.4.12. Исследование волнистости при шлифовании дорожки качения за период между правками, обозначение рис.4.11 (условия эксперимента см. рис.4.9)

При шлифовании большое влияние на величину Rz оказывала правка абразивного инструмента. На рис.4.13 показаны результаты исследования влияния процесса правки на величину шероховатости поверхности дорожки качения колец подшипников.

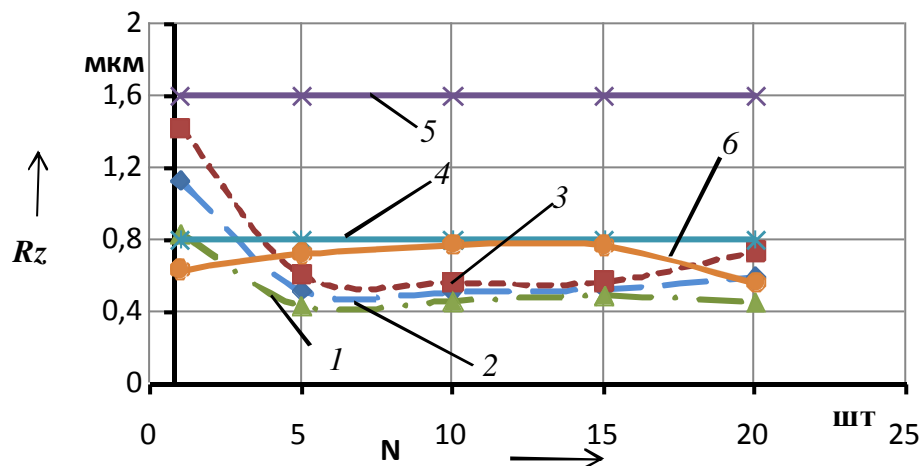


Рис.4.13. Влияние правки абразивного инструмента на шероховатость поверхности дорожки качения внутреннего кольца подшипника:
 1 – поле распределения минимальных значений Rz шероховатости, 2 – поле распределения средних значений Rz шероховатости, 3 – поле распределения максимальных значений Rz шероховатости, 4 – нижняя граница поля допуска Rz по ТП, 5 – верхняя граница поля допуска Rz по ТП, 6 –

экспериментальные значения R_z шероховатости при шлифовании с водной СОЖ

Исследованиями установлено, что при шлифовании с водной СОЖ период правки круга увеличился до 30 деталей с сохранением шероховатости поверхности. При этом шероховатость изменяется за период правки незначительно, что говорит о большей стабильности процесса и о равномерном износе по профилю рабочей поверхности инструмента.

Исследование величины шероховатости поверхности дорожки качения колец подшипников при чистовом шлифовании с выхаживанием показали, что величина R_a , определяемая по амплитуде автокорреляционной функции (формулы 3.2 – 3.4) больше во всем диапазоне работы абразивного инструмента на 15...20 % по сравнению с величиной R_a , определяемой по профилограммам (рис.4.14). Это связано с тем, что при анализе шероховатости по новой методике учитывалось влияние дефектов, полученных при шлифовании. Были получены регрессионные зависимости величины шероховатости поверхности $R_a(x)$ с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,98$ метода профилографирования измерения данного параметра поверхности за период между правками ШК (y):– $y = 0,02x + 0,777$ и регрессионные зависимости величины шероховатости поверхности $R_a(x)$ с коэффициентом парной корреляции $R_2 = 0,98$ для оптико-электронного комплекса при измерении данного параметра поверхности за период между правками ШК $y = 0,016x + 0,0879$.

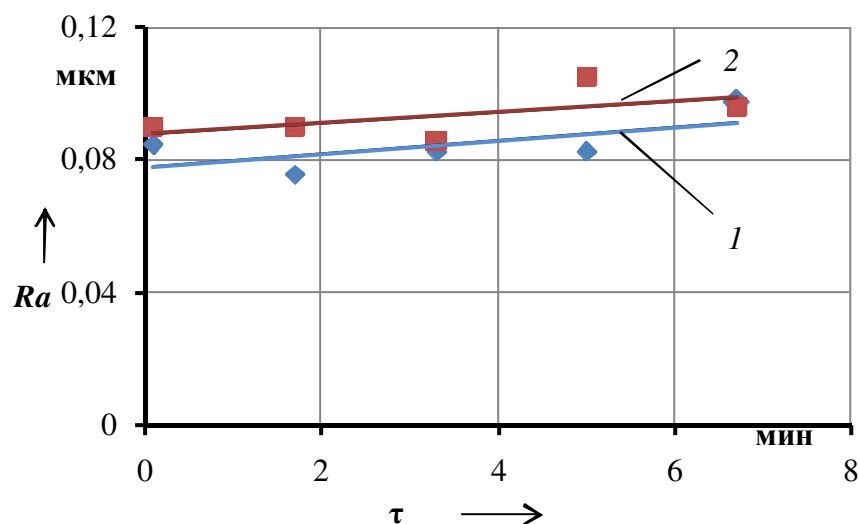
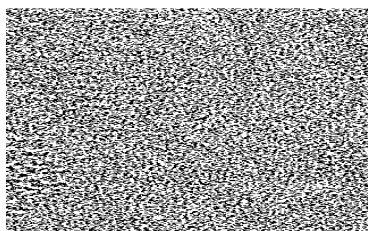
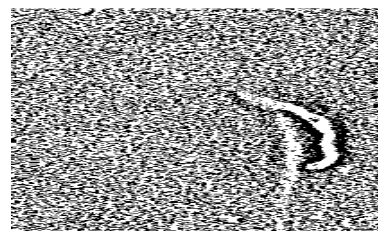


Рис.4.14. Сравнение методов исследования шероховатости поверхности: 1 – профилографирование; 2 – оптико-электронный комплекс

На рис.4.15 показано, что при анализе шероховатости поверхности дорожек качения колец через автокорреляционную функцию, величина Ra повысилась с 0,058 мкм до 0,098 мкм.



$A_{cp} = 13,42, Ra = 0,058$ мкм



$A_{cp} = 14,03, Ra = 0,098$ мкм

Рис.4.15. Влияние дефекта на величину шероховатости

Проведены экспериментальные исследования влияния поперечной подачи на отклонение от круглости дорожек качения колец подшипников, типичные круглограммы поверхности приведены в приложении 4.

На рис.4.16 показаны результаты исследований деформации кольца в зависимости от врезной подачи и угла $\alpha = 5^\circ - 20^\circ$ (см. глава 2), полученные в результате теоретических расчетов, и значения отклонения от круглости

колец подшипников, полученные за цикл обработки при шлифовании с водной СОЖ.

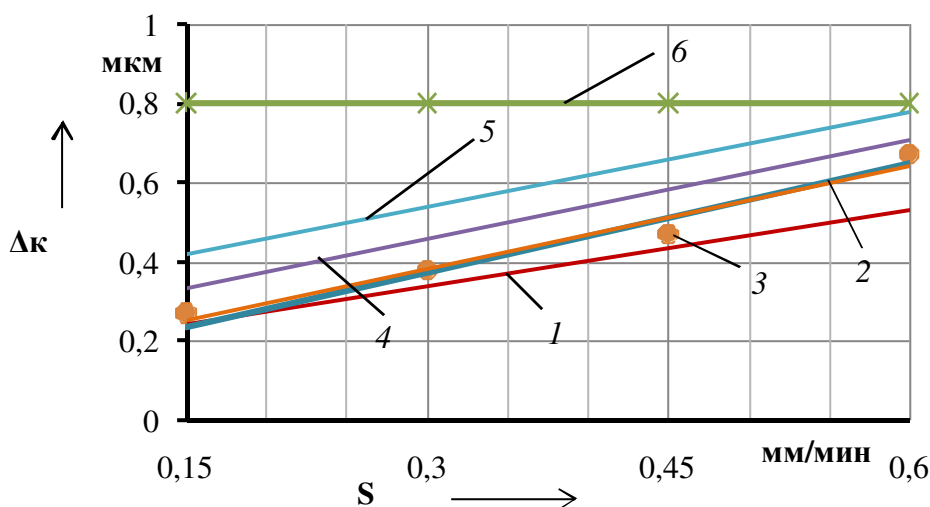


Рис.4.16. Сравнение деформации кольца в процессе шлифования и отклонения от круглости дорожек качения: 1 – значения деформации кольца при $\alpha = 5^\circ$; 2 – значения деформации кольца при $\alpha = 10^\circ$; 3 – экспериментальные значения отклонения от круглости при $\alpha = 10^\circ$; 4 – значения деформации кольца при $\alpha = 15^\circ$; 5 – значения деформации кольца при $\alpha = 20^\circ$; 6 – максимально допустимое значение отклонения от круглости по ТП;

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

Выводы:

1. Установлено, что при применении водной СОЖ повышалось отклонение от круглости на 10 – 15 %, шероховатость поверхности, высота волнистости и гранности практически не изменилась, в тоже время отклонение от профиля снижается с 2,1 мкм до 1,3 мкм, т.е. в 1,6 раза.
2. Сравнение теоретических и экспериментальных исследований показало, что отклонение от круглости дорожек качения колец подшипников

связано с деформацией кольца подшипника, полученной при исследовании напряженно-деформированного состояния.

3. Установлено, что величина Ra , определяемая по амплитуде автокорреляционной функции, больше во всем диапазоне работы абразивного инструмента на 15...20 % по сравнению со значениями величины Ra , полученными по профилограммам.

Глава 5. Оптимизация процесса бесцентрового профильного шлифования

Нахождение оптимальных режимов шлифования сложный и многогранный процесс проведение научных исследований [1, 33, 35, 42, 46, 61, 87, 106 и др.]. В основу построения моделей технологических процессов входят составление систем линейных неравенств, описывающих технические ограничения и целевая функция [1, 62, 64, 96, 106, и др.]. Для моделирования технологического процесса нужно учитывать как параметры процесса обработки (силы и температуры шлифования), так и параметры качества поверхности (отклонение от круглости, волнистость, гранность, шероховатость, прижоги и др. показатели).

Постановка задачи оптимизации режимов операции бесцентрового шлифования дорожек качения колец приборных подшипников при заданном качестве поверхности включают следующие основные этапы (см. рис.5.1):

1. Выявление параметров качества, которые оказывают наибольшее влияние на режимы обработки;
2. Определение целевой функции или критериев оптимизации;
3. Нахождение системы технических ограничений;
4. Установление метода оптимизации.

В систему оптимизируемых параметров входили те параметры, которые оказывают существенное влияние на точность обработки и производительность процесса. При бесцентровом шлифовании на жестких опорах дорожек качения колец подшипников такими параметрами в нашем случае являются: предельно допустимая амплитуда автокорреляционной функции обрабатываемой поверхности, эффективная мощность при шлифовании, допустимая деформация кольца, допустимый уровень температуры шлифования, величина припуска.

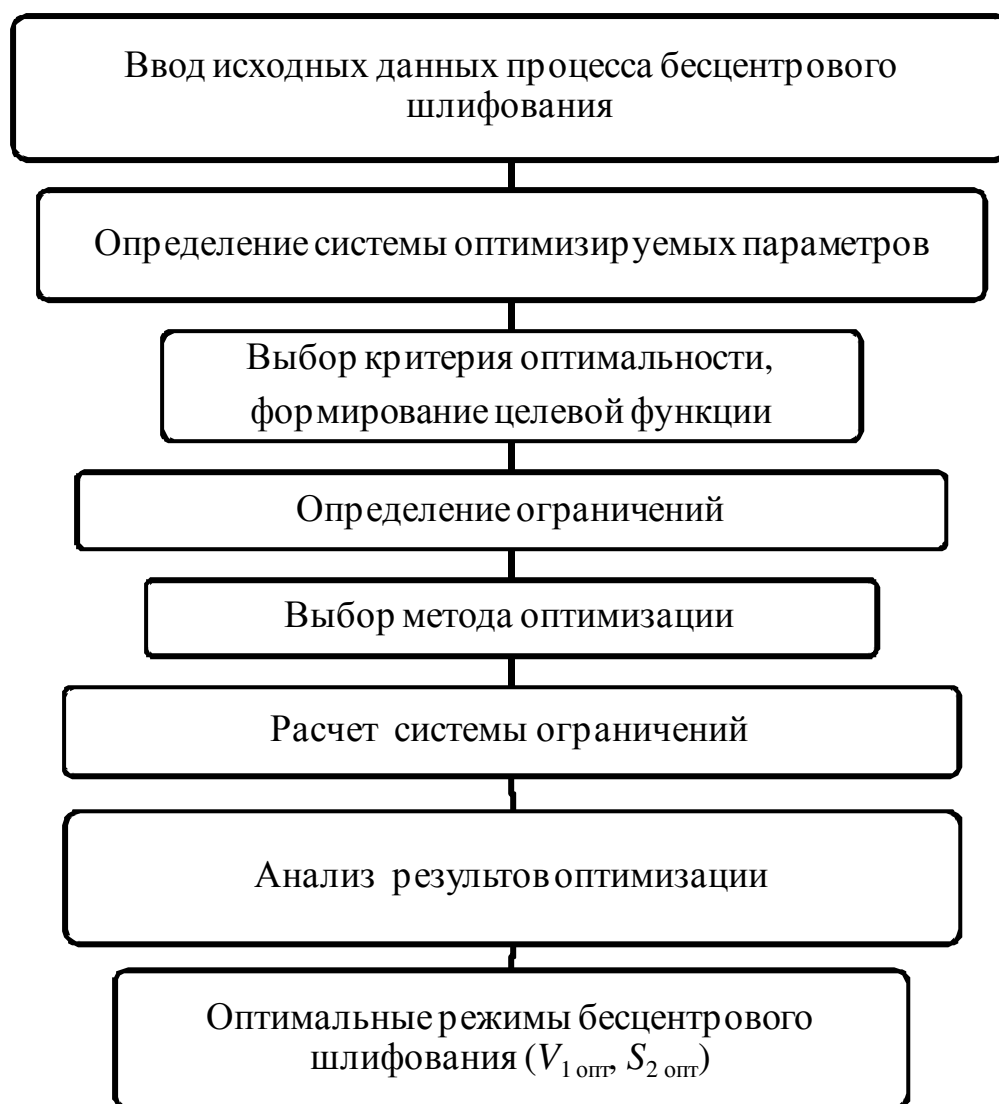


Рис.5.1. Структурная схема оптимизации

Как показано в цели исследования главной задачей является достижение максимальной производительности процесса шлифования Q мм³/мин.

При профильном шлифовании кольца подшипника с радиальной подачей производительность определяется по формуле:

$$Q = 10^3 \cdot V_1 \cdot l_3 \cdot S_2 \rightarrow \max; \quad (5.1)$$

где l_3 – длина (ширина) шлифуемой поверхности желоба подшипника, мм; S_2 – поперечная подача в мм/об кольца подшипника, V_1 – скорость вращения кольца подшипника, м/мин.

Таким образом, производительность процесса профильного шлифования колец подшипников зависит от двух режимных параметров: V_1 и S_2 .

5.1 Моделирование режимов бесцентрового профильного шлифования

Подробно вопрос определения оптимальных режимов профильного шлифования колец подшипников в зависимости от требуемых технических ограничений описан в работах [33, 61, 62].

Ограничение 1.

Связано с предельно допустимой амплитудой автокорреляционной функции обрабатываемой поверхности профиля дорожки качения колец подшипников. Используем выражение [64], т.е. $A_{cp} \leq [A_{cp}] = 24$ ($Rz = 0,8$ мкм), $A_{cp} \leq [A_{cp}] = 20$ ($Rz = 0,6$ мкм), $A_{cp} \leq [A_{cp}] = 16$ ($Rz = 0,4$ мкм)

При шлифовании с радиальной подачей неравенство примет вид

$$V_1^{ya} \cdot S_2^{za} \leq \frac{A_{cp} \cdot V_k^{xa} \cdot d^\mu}{C_a \cdot B_k^{ua} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4}. \quad (5.2)$$

Ограничение 2.

Связано с эффективной мощностью при профильном шлифовании N_3 , которая не должна превышать мощность привода шлифовального станка $N_{ст}$, т.е.

$$N_{ст} \geq N_3.$$

Мощность привода станка $N_{ст} = N \cdot \eta$, где N – мощность привода главного движения шлифовального станка (108 Вт); η – коэффициент полезного действия шлифовального станка (0,8).

При врезном шлифовании периферией круга по данным А. Г. Косиловой и С. К. Мещерякова [90]:

$$N_3 = C_N \cdot V_1^r \cdot S_2^x \cdot d_3^q \cdot B_3^z \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \quad (5.3)$$

Значение коэффициентов C_N и показателей степени и коэффициенты K_5 , K_6 и K_7 принимается по справочнику.

Подставив известные значения N_{ct} и N_y в уравнение (5.3) получим следующее техническое ограничение:

для наружного шлифования колец подшипников с радиальной подачей

$$V_1^r \cdot S_2^x \leq \frac{N \cdot \eta}{C_N \cdot d_3^q \cdot B_3^Z \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7}. \quad (5.4)$$

Ограничение 3.

Связано с деформацией кольца в процессе шлифования на жестких опорах, ее влиянием на отклонение от круглости дорожки качения кольца подшипника. Допустимая деформация кольца обеспечивается следующим условием [47, 61, 90]:

$$\frac{P_y \cdot d_3^3}{50 \cdot E \cdot I} \leq [f_{max}], \quad (5.5)$$

где $[f_{max}]$ – максимальный прогиб кольца, допускаемый отклонением от круглости дорожки качения, назначается техническими условиями обработки колец, мм.

По данным [44] E – модуль упругости (для сталей $E=2,11 \cdot 10^5$ МПа), P_y – рассчитывается по формуле (раздел 2).

Запишем техническое ограничение для круглого наружного шлифования с радиальной подачей:

$$V_1^r \cdot S_2^y \leq \frac{E \cdot I \cdot [f_{max}] \cdot V_K}{20 \cdot C_N \cdot d_3^{(3+q)} \cdot B_3 \cdot K_q \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7}. \quad (5.6)$$

Ограничение 4

Связано с допустимым уровнем температуры шлифования Θ_{max} , влияющим на структурные и фазовые изменения в обрабатываемом материале, и приводящим к возникновению прижогов и микротрещин [1, 106, 109 и др.]. В. А. Сипайлов предложил формулу для расчета максимальной температуры при шлифовании с учетом влияния плотности тепловых потоков q :

$$\Theta_{max} \approx \frac{2q}{\lambda_M} \cdot \sqrt{\frac{L_k \cdot a_M}{\pi \cdot V_1}}, \quad (5.7)$$

где λ_M и a_M – соответственно коэффициенты теплопроводности и температуропроводности стали ШХ15; L_K – длина дуги контакта ШК с кольцом; q – кал/см²; a_M – см²/с; λ_M – кал/см·С°·С; V_I – см/с; L_K – см.

Плотность теплового потока определяется по формуле [90]:

$$q = \frac{P_z \cdot V_K}{0,427 \cdot F_k} = \frac{239 \cdot N_3}{F_R} \cdot [\text{кал/см}^2 \cdot \text{с}], \quad (5.8)$$

где P_z – кг, V_k – м/с, F_k – площадь контакта в см², N – 89Вт.

В табл. 5.1 приведены значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности стали ШХ15 [44].

Таблица 5.1

Теплофизические свойства подшипниковой стали ШХ15 [44]

Марка материала	Критические точки, в °С		Коэффициент теплопроводности λ_M , кал/см.с.гр	Коэффициент температуропроводности a_M , см ² /с
	A _{C1}	A _{C3}		
Ст ШХ15	724	900	0,14	0,065

Техническое ограничение, связанное с температурой шлифования Θ , определяет положением критических точек температурных аллотропических изменений A_{C1} и A_{C3}. Для стали ШХ15 $\Theta_{кр} = 700...800^\circ\text{С}$. Тогда четвертое техническое ограничение примет вид $\Theta_{кр} \leq \Theta$ или

$$\Theta_{кр} \approx \frac{2q}{\lambda_M} \cdot \sqrt{\frac{L_K \cdot a_M}{\pi \cdot V_1}}. \quad (5.9)$$

Особенностью расчетов режимов обработки для профильного шлифования является определение N_3 , F_k и L_k через S_2 , которая имеет размерность мм/обор., тогда для профильного наружного шлифования

$$V_1^{(r-0,5)} \cdot S_2^{(x-0,25)} \leq \frac{\Theta_{кр} \cdot \lambda_M \cdot d_3^{(0,25-q)} \cdot (d_3 + D_K)^{0,25}}{943 \cdot a_M^{0,5} \cdot D_K^{0,25} \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot B_3^Z}. \quad (5.10)$$

Ограничение 5.

Припуск оказывает существенное влияние на производительность процесса профильного шлифования кольца подшипника. Расчетный припуск h_{onm}

не должен быть меньше операционного припуска на диаметр $(2 \cdot Z_{max})_i$, т.е. $h_{onm} \leq (2 \cdot Z_{max})_i$.

При профильном шлифовании с радиальной подачей:

$$S_2^{X_s} \leq \frac{C_s \cdot (2Z_{max})^{q_s}}{d_3^{n_s} \cdot B_3^{0,6}}. \quad (5.11)$$

Таким образом, математическая модель процесса профильного наружного шлифования примет вид:

$$\begin{aligned} V_1^{y_a} \cdot t^{Z_a} \cdot S_1^{U_a} &\leq \frac{A_{cp} \cdot V_K^{X_a} \cdot d^\mu}{C_a \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot B^4 a}; \\ V_1^\Gamma \cdot t^x \cdot S_1^y &\leq \frac{N \cdot \eta}{C_N \cdot d_3^q \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7 \cdot B_3^y}; \\ V_1^\Gamma \cdot t^x \cdot S_1^y &\leq \frac{E \cdot I \cdot [f_{max}] \cdot V_K}{20 \cdot C_N \cdot d_3^{(3+q)} \cdot B_k^y \cdot K_q \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7}; \\ V_1^{(r-0,5)} \cdot t^{(x-0,25)} \cdot S_2^{(y-1)} &\leq \frac{\Theta_{кр} \cdot \lambda_M \cdot d_3^{(0,25-q)} \cdot B_K^{(1-y)}}{8765 \cdot a_M^{0,5} \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7}; \\ V_1^{Z_s} \cdot t^{X_s} \cdot S_1^{y_s} &\leq \frac{C_s \cdot d_3^{n_s} \cdot (2Z_{max})^{q_s}}{B_K^{y_s}}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Для решения системы уравнений принимаем целевую функцию в виде

$$f(x_1, x_2, x_3) = x_1 + x_2 + x_3 \rightarrow \max \quad (5.13)$$

После совместного решения системы уравнений (5.12) и целевой функции форм. (5.13) определяем оптимальные режимы обработки: V_{lonm} и S_{lonm} . Найденные значения режимов обработки подставляются в форм. (5.1) и находится величина Q_p . Величина Q_p сравнивается с заданной производительностью Q и, если $Q_p \leq Q$, то операция шлифования спроектирована правильно.

5.2. Расчет оптимальных режимов шлифования

Рассмотрим пример расчета оптимальных режимов процесса шлифования дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника для масляных и водных СОЖ.

Технология производства колец подшипников предусматривает на заключительных операциях технологического процесса применение операций шлифования при постоянной подаче СОЖ. Окончательную обработку наружной поверхности дорожки качения внутреннего кольца осуществляют на станках Bryant 1-М, со следующими режимами: скорость круга 42 м/с, частота вращения шпинделя $n_k = 750 \dots 1450$ об/мин; коэффициент полезного действия $\eta = 0,8$. На операции используется абразивный круг 91AF320M9V22 (91A M40 C1 9 K22), с размерами 355 x 16 x 127.

Ограничение 1. Связано с предельно допустимой амплитудой автокорреляционной функции обрабатываемой поверхности дорожки качения колец подшипников:

$$V_1^{y_a} \cdot S_2^{z_a} \leq \frac{A_{cp} \cdot V_k^{x_a} \cdot d^\mu}{C_a \cdot B_k^{y_a} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4},$$

где $A_{cp} = 16$, $V_k = 42$ м/с, $d = 4,2$, $\mu = 0,2$, $C_a = 20$, $B_k = 1$ 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 на масляной СОЖ $K_1 = 1,4$, при шлифовании на водной СОЖ $K_1 = 1,0$.

Ограничение 2. Связано с отклонением от круглости кольца подшипника:

$$V_1^r \cdot S_2^y \leq \frac{E \cdot I \cdot [f_{max}] \cdot V_k}{20 \cdot C_N \cdot d \cdot B_3 \cdot d_3^q \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \cdot K_7},$$

где $E = 2,11 \cdot 10^5$ МПа, $I = 12,8$ мм⁴, $[f_{max}] = 0,0008$ 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 масляной СОЖ $K_7 = 0,88$, при шлифовании с водной СОЖ $K_7 = 1,1$.

Ограничение 3. Связано с допустимой температурой профильного шлифования Θ_{max} :

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

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

В процессе исследования сравнивались режимы шлифования с водной и масляной СОЖ (рис.5.2 и 5.3).

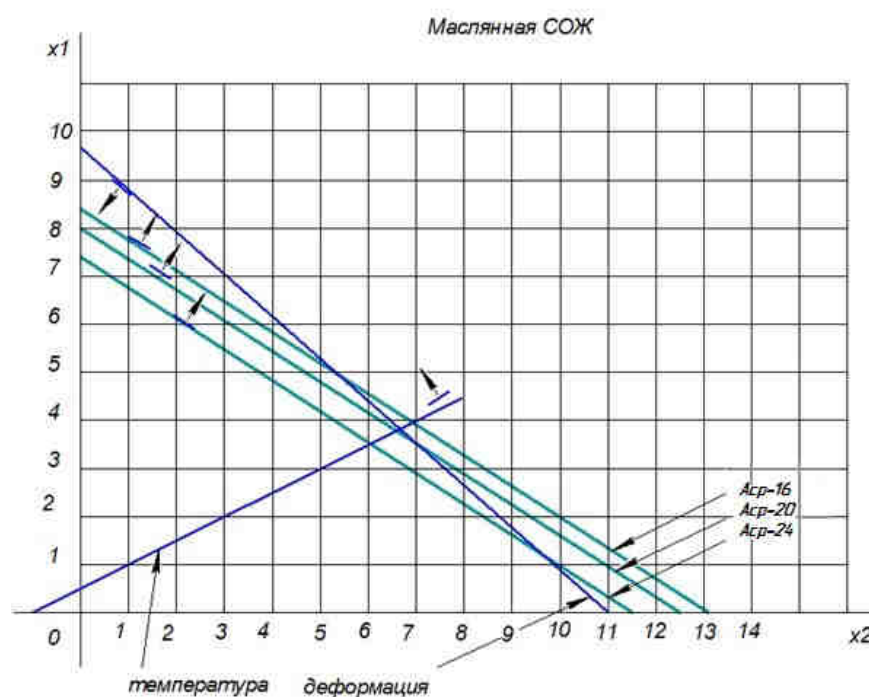


Рис.5.2. Математические модели процесса бесцентрового профильного шлифования дорожки качения с масляной СОЖ

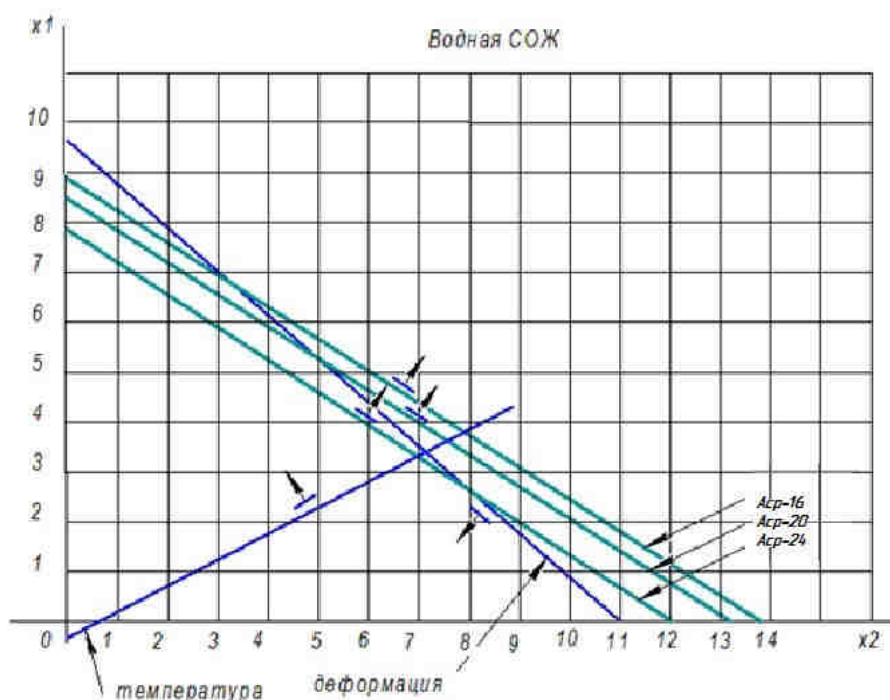


Рис.5.3. Математические модели процесса бесцентрового профильного шлифования дорожки качения водной СОЖ

В таблице 5.2 приведены оптимальные режимы шлифования при обработке с различными по составу СОЖ.

Таблица 5.2

Оптимальные режимы шлифования

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

Исследования показали, что при шлифовании с водной СОЖ скорость вращения детали несколько ниже на 10 – 15 %, а врезная подача увеличилась в 2,4 – 2,6 раза. Таки образом, производительность процесса шлифования увеличилась в диапазоне исследуемой шероховатости поверхности более чем в два раза.

Моделирование процесса профильного шлифования позволило сделать следующие выводы:

1. Обоснованность применения системно-структурного подхода к оптимизации процесса профильного шлифования колец подшипников;
2. Целесообразность опытно-экспериментального подхода при моделировании процесса профильного шлифования, с учетом технических ограничений;
3. Обоснованность выбора следующих технических ограничений: амплитуды автокорреляционной функции поверхности дорожки качения, предельное отклонение от круглости дорожки качения и температура шлифования, а также кинематические возможности станка.

Глава 6. Техничо – экономическая эффективность результатов исследований

6.1. Показатели эффективности процесса

Эффективность использования результатов исследований процесса шлифования дорожки качения колец приборных подшипников связана с повышением производительности обработки путем оптимизации режимов шлифования (сокращением машинного времени). При этом, обязательным условием является обеспечение требуемого качества шлифованных деталей (шероховатости, волнистости, отклонения от круглости, точности профиля, отсутствие дефектов шлифования).

Рассмотрим экономическую эффективность от применения водозмульсионной СОЖ на операции профильного шлифования дорожки качения внутреннего кольца приборного подшипника №2000083S вместо использования масляной СОЖ и технологии ее очистки от механических примесей (см. таблица 6.1). Операция шлифования внутренних колец подшипников осуществлялась на круглошлифовальном станке модели «Брайант М – 1» на жестких опорах, шлифовальным кругом следующих характеристик: 91AF320M9V22 (91A M40 C19K22), размер круга нового 355x16x127, размер круга изношенного 280x16x127.

Таблица 6.1

Сравнение режимов обработки при шлифовании дорожки качения кольца приборного подшипника.

Вид СОЖ	Оптимальные режимы	При $A_{cp} = 16$ ($Ra = 0,08$ мкм)	При $A_{cp} = 20$ ($Ra = 0,12$ мкм)	При $A_{cp} = 24$ ($Ra = 0,16$ мкм)
1	2	3	4	5
Масло ИС – 12 – 97 %, олеиновая кислота – 3 %	V_{1opt} , м/мин,	33	40	49
	S_{2opt} , мм/мин	0,4	0,66	1,1

Продолжение таблицы 6.1

1	2	3	4	5
	$n_{I_{\text{опт}}}$, об/мин	1100	1300	1600
	$S_{o2\text{опт}}$, мм/об	0,00036	0,0005	0,00075
	Припуск черновой, мм	0,2	0,2	0,3
	Припуск чистовой, мм	0,1	0,1	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин (черновое)	0,5	0,3	0,27
	$t_{\text{шт1}}$, мин (чистовое)	0,25	0,15	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин (выхаживание)	0,07	—	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин	0,82	0,45	0,27
	$V_{I_{\text{опт}}}$, м/мин,	27	36	44
Водная	$S_{2\text{опт}}$, мм/мин	1,09	1,8	2,6
	$n_{I_{\text{опт}}}$, об/мин	900	1200	1300
	$S_{o2\text{опт}}$, мм/об	0,0012	0,0015	0,002
	Припуск черновой, мм	0,2	0,2	0,3
	Припуск чистовой, мм	0,1	0,1	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин (черновое)	0,18	0,11	0,12
	$t_{\text{шт1}}$, мин (чистовое)	0,09	0,06	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин (выхаживание)	0,04	—	—
	$t_{\text{шт1}}$, мин	0,31	0,17	0,12

В соответствие с этими расчетами строим цикл обработки профиля дорожки качения колец подшипников с применением масляной СОЖ. При обработке масляной СОЖ принимаем цикл операции по новой операционной

карте: черновая поперечная подача $S_{2\text{черн}} = 0,66$ мм/мин ($Ra = 0,12$ мкм), припуск на черновую обработку $Z_{\text{пз}} = 0,2$ мм, штучное время на черновую обработку $t_{\text{шт1}} = 0,3$ мин.; чистовая поперечная подача $S_{2\text{чист}} = 0,4$ мм/мин ($Ra = 0,08$ мкм), припуск на чистовую обработку $Z_{\text{пз}} = 0,1$ мм, $t_{\text{шт1}} = 0,25$ мин; выхаживание $t_{\text{шт1}} = 0,07$ мин. Итого общее технологическое время составит $t_{\text{што}} = 0,72$ мин (43 с), что несколько больше, чем по технологической карте разработанной заводом **$t_{\text{што}} = 0,53$ мин (32 с).**

При обработке водной СОЖ принимаем следующий цикл обработки: черновая поперечная подача $S_{2\text{черн.}} = 1,8$ мм/мин ($Ra = 0,12$ мкм), припуск на черновую обработку $Z_{\text{пз}} = 0,2$ мм, штучное время на черновую обработку $t_{\text{шт1}} = 0,11$ мин; чистовая поперечная подача $S_{2\text{чист}} = 1,09$ мм/мин ($Ra = 0,08$ мкм), припуск на чистовую обработку $Z_{\text{пз}} = 0,1$ мм, $t_{\text{шт1}} = 0,09$ мин; выхаживание $t_{\text{шт1}} = 0,04$ мин.

Итого общее технологическое время составит $t_{\text{што}} = \mathbf{0,24}$ мин (15 с).

Таким образом, производительность процесса обработки профиля дорожки качения подшипников при использовании водной СОЖ, вместо масляной, повысилась в 1,7 – 2,0 раза.

Таблица 6.2

Исходные данные для расчета экономического эффекта от внедрения результатов разработок в производство

Условия шлифования	СОЖ	
	масляная	водоэмульсионная
1	2	3
Состав	Масло ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3 %.	3 – ная эмульсия АРС – 21М
Шлифовальный круг	1–355x8x200 91AF320M9V22	1–355x8x200 91AF320M9V22
Стоимость шлифовального круга, руб.	9985	9985

Продолжение таблицы 6.2

1	2	3
Расход шлифовальных кругов	8	6
Размеры заготовки	$D_3 = 4,2 \text{ мм};$ $l_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$	$D_3 = 4,2 \text{ мм};$ $l_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$
Материал	ШХ15 HRC 62 – 65	ШХ15 HRC 62 – 65
Правящий инструмент	Алмазный карандаш Ц2	Алмазный карандаш Ц2
Период правки	20 деталей	30 деталей
Стоимость алмазного карандаша, руб	1300	1300
Штучное время, $t_{\text{шт1}}$, мин (общее)	0,53	0,24
Производительность процесса дет./смену	600	1000
Стоимость 1 л СОЖ, руб.	100,0	1000 руб/м ³
Расход СОЖ на 1 станок в л/год	55л/уст. 110 л/год	70л/уст. 3000 л/год
Стоимость установки для очистки СОЖ, руб.	20000	50000
Количество брака, по прижогам, %	нет	нет
Количество брака, по дефектам дорожки качения, %	5	1,5
Себестоимость изготовления 1 кольца, руб.	27,7	27,7

Для определения экономической эффективности использования результатов исследований в промышленности выполнили расчет и анализ технологической себестоимости, состоящей только из суммы тех издержек, которые непосредственно связаны с данным вариантом технологического процесса и им обусловлены (см. таблица 6.2).

Сравнение сумм затрат по вариантам позволяет определить величину годового экономического эффекта от применения СОЖ на 1 станок:

$$\mathcal{E}_{\text{гс}} = (C_{N1} - C_{N2}) + E_{\text{н}} (K_1 - K_2), \quad (6.1)$$

где C_{N1} – стоимость масляной СОЖ в год, руб. (стоимость 1 л масляной СОЖ – 100 руб., расход 110 л на 1 станок, замена СОЖ производится 2 раза в год), C_{N2} – стоимость водной СОЖ в год при работе на 1 станке, руб. (стоимость 1 м³ – 1000 руб., на 1 станок требуется 3 м³); K_1 и K_2 – капиталовложения (стоимость установок для очистки СОЖ, $K_1 = 20000$ руб. и $K_2 = 50000$ руб.) по 1 и 2 вариантам, руб.; $E_{\text{н}}$ – нормативный коэффициент сравнительной экономической эффективности (0,1).

Тогда экономический эффект от применения водной СОЖ составит

$$\mathcal{E}_{\text{гс}} = (100 \cdot 110 - 3 \cdot 1000) + 0,1(20000 - 50000) = 8000 - 3000 = 5000 \text{ руб.}$$

При расчете годовой экономии, получаемой в результате уменьшения расхода шлифовальных кругов и правящих инструментов $\mathcal{E}_{\text{гэ}}$, использовали формулу

$$\mathcal{E}_{\text{гэ}} = (C_{\text{гк1}} - C_{\text{гк2}}) + (C_{\text{гп1}} - C_{\text{гп2}}), \quad (6.2)$$

где $C_{\text{гк1}}$ и $C_{\text{гк2}}$ – стоимость годового расхода шлифовальных кругов соответственно по 1 и 2 вариантам технологического процесса, руб.; $C_{\text{гп1}}$ и $C_{\text{гп2}}$ – стоимость годового расхода правящих инструментов соответственно по 1 и 2 вариантам технологического процесса, руб.

6.2. Методика расчета экономической эффективности

Расчет расхода абразивных кругов.

1 вариант (масляная СОЖ).

За одну правку с круга снимается припуск 0,05 мм.

Рабочая часть круга составляет 40 мм.

Программа выпуска на 1 станок 600 деталей в смену

Правка осуществляется через 20 деталей

За 1 смену осуществляется $600:20 = 30$ правок

Износ круга за 1 смену – 1,5 мм.

Круг работает до полного износа $40 \text{ мм}:1,5 \text{ мм} = 26$ смен

Определим количество шлифовальных кругов в год: $200:26 \text{ смен} = 8$ кругов

2 вариант (водная СОЖ).

За одну правку снимается 0,04 мм шл. круга.

Рабочая часть круга составляет 40 мм.

Программа выпуска на 1 станок 1000 деталей в смену.

Правка осуществляется через 30 деталей.

За 1 смену осуществляется 33 правки.

Износ круга за 1 смену – 1,32 мм.

Круг работает до полного износа $40 \text{ мм}:1,32 \text{ мм} = 30$ смен

При работе шлифовального станка в год 200 смен определим количество шлифовальных кругов на 1 станок $200:30 = 6$ кругов.

Расчет расхода правящего инструмента

В первом варианте алмазный карандаш Ц2 выдерживает до переточки 500 правок, поэтому требуется в год на 1 станок $200 \cdot 30:500 = 12$ карандашей.

Во втором варианте алмазный карандаш Ц2 выдерживает до переточки 600 правок, поэтому требуется в год на 1 станок $200 \cdot 33:600 = 11$ карандашей.

Тогда экономический эффект по абразивному и правящему инструменту составит:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_{\text{гэ}} &= (C_{\text{гк1}} - C_{\text{гк2}}) + (C_{\text{гп1}} - C_{\text{гп2}}) = (9985 \cdot 8 - 9985 \cdot 6) + (1300 \cdot 13 - 1300 \cdot 11) \\ &= 19970 + 2600 = 22570 \text{ руб.}\end{aligned}$$

Тогда общий экономический эффект на 1 деталь рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\tau} = C_{\text{м}}(T'_{\text{шт1}} - T'_{\text{шт2}}) + \mathcal{E}_{\text{кп}} - \mathcal{E}_{\text{гс}}, \quad (6.3)$$

где $C_{\text{м}}$ – стоимость одной минуты работы станка, руб./мин; $T_{\text{шт}}$ – штучное время, мин; $\mathcal{E}_{\text{кп}}$ – экономия, связанная со снижением затрат на круг и правящий инструмент в расчете на одну деталь, руб. ($22570 : 600 \cdot 200 = 0,19$ руб./дет.), $\mathcal{E}_{\text{гс}}$ – экономия от замены СОЖ в расчете на 1 деталь ($5000 : 600 \cdot 200 = 0,042$ руб./дет.).

Подставим найденные значения в формулу и получим при поминутной оплате $C_{\text{м}} = 2,1$ руб/ мин:

$$\mathcal{E}_{\tau} = C_{\text{м}}(T'_{\text{шт1}} - T'_{\text{шт2}}) + \mathcal{E}_{\text{кп}} - \mathcal{E}_{\text{гс}} = 2,1(0,53 - 0,24) + 0,232 = 0,832 \text{ руб./дет.}$$

Общий годовой экономический эффект от повышения производительности труда на 1 станок составляет при программе выпуска 120000 шт.

$$\mathcal{E}_{\pi} = 0,832 \cdot 120000 = 99840 \text{ руб.}$$

Найдем экономический эффект от снижения брака при изготовлении колец при цене 1 кольца 27,7 руб.

$$\mathcal{E}_{\text{к}} = C_{\text{к}} \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot N_{\text{г}} = 27,7(0,05 - 0,015) \cdot 120000 = 116340 \text{ руб.}$$

Общий годовой экономический эффект на 1 станок составляет

$$\mathcal{E}_{\text{о}} = \mathcal{E}_{\pi} + \mathcal{E}_{\text{к}} = 99840 + 116340 = 216180 \text{ руб.}$$

Выводы

1. Источниками экономической эффективности использования в промышленности результатов диссертационной работы являются:

- увеличение периода правки шлифовальных кругов и износа правящих инструментов;
- интенсификация режима шлифования и уменьшение машинного и штучного времени;
- снижение брака при обработке колец подшипников.

2. Наибольший экономический эффект достигается за счет интенсификации режима обработки и соответствующего повышения производительности шлифования в 1,7 – 2,0 раза.

3. Результаты экономических расчетов подтверждены опытной промышленной проверкой и внедрением результатов исследований при изготовлении приборных подшипников на ООО «ЗПП» с общим годовым экономическим эффектом 216180 руб.

Заключение

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

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

3. Экспериментальными исследованиями установлено, что применение водной СОЖ стабилизирует отклонение от круглости и шероховатость поверхности, высоты волнистости и гранности практически не изменились, снижается отклонение от профиля 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 от действия 3-х факторов: упругих деформаций кольца в процессе шлифования, отклонения от круглости базовых поверхностей колец подшипников 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 опытной промышленной проверкой и внедрением результатов исследований при изготовлении приборных подшипников на ООО «ЗПП» с общим экономическим эффектом 216180 руб.

Библиографический список.

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: справочник / под. общ. ред. А. Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. Абразивные материалы и инструменты: справочник-каталог / под общ. ред. В. А. Рыбакова. – НИИМАШ, М, 1976. – 385 с.
3. Абрамов, А. Д. Определение шероховатости поверхности дорожек качения приборных подшипников с использованием квазиоптимального корреляционного алгоритма / А. Д. Абрамов, А. И. Зинковский, Н. В. Носов, А. И. Никонов, В. А. Родионов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т.13. – № 4 – 3. – С.645 – 651.
4. Абрамов, А. Д. Оценка шероховатости поверхности опико-электронным методом / А. Д. Абрамов, Н. В. Носов, И А. Подсекин, В. Н. Воронин // Вестник Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2005. – № 33. – С.89 – 94.
5. Авдулов, А. Н. Контроль и оценка круглости деталей машин / А. Н. Авдулов. – М.: Изд-во стандартов, 1974. – 176 с.
6. Антонец, И. В. Методы расчета и моделирования упругих элементов: учебное пособие / И. В. Антонец, А. П. Терешенок. – Ульяновск: УлГТУ, 2013. – 121 с.
7. Байкалов, А. К. Введение в теорию шлифования материалов / А.К. Байкалов. – Киев: Наукова думка, 1978. – 207 с.
8. Бедеутунг, Р. Влияние качества поверхности шлифовального круга на процесс шлифования / Р.Бедеутунг // Автомат. линии и металлореж. ст – ки. Экспресс. – инф. – 1975. – № 5. – С.1 – 21.
9. Богомолов, Н. И. Исследование прочности абразивных зерен в процессе микрорезания / Н. И. Богомолов. – Заводская лаборатория. –1966. – №3. – С.353 –354.
10. Бржозовский, Б. М. Определение параметров дефектов инструмента, модифицированного воздействием низкотемпературной плазмы / Б. М.

Бржозовский, Е. П. Зинина, В. В. Мартынов, Е. С. Плешакова // Известия Волгоградского государственного технического университета: межвуз. сб. науч. ст. – № 8 (135) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С.13.

11. Брозголь, И. М. Влияние финишных операций на долговечность подшипников / И. М. Брозголь. – М., НИИНАвтопром, 1979. – 62 с.

12. Булыжев, Е. М. Интегрированная технологическая система очистки ВТЖ / Е. М. Булыжев, Э. Е. Булыжев, Е. П. Терешенок // Справочник. Инженерный журнал. – 2010. – № 12. Приложение – С.10 – 14.

13. Булыжев, Е. М. Ресурсосберегающее применение СОЖ при металлообработке / Е. М. Булыжев, Л. В. Худобин. – М.: Машиностроение, 2004. – 352 с.

14. Васин, А. Н. Влияние наладочных параметров бесцентрово-шлифовального станка на режим обработки / А. Н. Васин, П. Ю. Бочкарев // СТИН. – 2005. – № 12. – С. 5 – 8.

15. Виноградов, Д. В. Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании металлов: учеб. пособие. Часть 1: Функциональные действия / Д. В. Виноградов. – М.: МГТУ им. Баумана, 2013. – 90 с.

16. Гаршин, А. П. Абразивные материалы / А.П. Гаршин, В. М. Гропянов, Ю. В. Лагунов. – Л.: Машиностроение, Ленинград. отд., 1983. – 231 с.

17. Гусев, В. Г. Формирование волнистости поверхностей шлифуемых сборными абразивными кругами // Известия вузов: Машиностроение. – 1987. – № 8. – С.151 – 155.

18. ГОСТ 2789 – 73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартиформ, 2006. – 6 с.

19. ГОСТ 9378 – 93 (ИСО 2632-1-85, ИСО 2632-2-85) Образцы шероховатости поверхности (сравнения). Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартиформ, 1996. – 12 с.

20. ГОСТ 24642-81. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 44 с.

21. Дубровский, Ю. В. Наладка внутришлифовальных станков с жесткими опорами / Ю. В. Дубровский, Ю. Е. Крахмалев // Станки и инструмент. – 1967. – № 1. – С. 10 – 11.
22. Захаров, О. В. Обеспечение технологической надежности при бесцентровой абразивной обработке: монография / Б. М. Бржозовский, О. В. Захаров // Саратов: СГТУ. – 2010. – 216 с.
23. Захаров, О. В. Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке: монография / О. В. Захаров. – Саратов: СГТУ, – 2006. – 152 с.
24. Захаров, О. В. Устойчивость бесцентрового шлифования с продольной подачей по силовым параметрам / О. В. Захаров // Автоматизация и современные технологии. – 2007. – № 11. – С. 9 – 11
25. Капанец, Э.Ф. Точность обработки при шлифовании / Э.Ф. Капанец, К.К. Кузьмич, В.И. Прибыльский, Г.В. Тилигузов. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 152 с.
26. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева // практическое руководство. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
27. Компьютерное моделирование и автоматизация технологических процессов в машиностроении: учебное пособие / Б. В. Бондин, Р. М. Лысак, Н. В. Носов, А. А. Черепашков. – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т. – 2008. – 91 с.
28. Конич, В. Влияние инструмента для правки и условий правки на топографию поверхности шлифовального круга и на результаты шлифования / В. Конич, В. Лоту // Экспресс – инф.: Режущий инструмент. – 1976. – № 24. – С.22 – 29.
29. Контунув, Н. Б. Прогрессивные методы абразивной, алмазной и эльборовой обработки в подшипниковом производстве / Н. Б. Контунув, А. М. Кузнецов, П. Н. Романов. – М.: Машиностроение, 1976. – 31 с.

30. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч.1. Состояние рабочей поверхности инструмента / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов: изд-во Сарат. Ун – та, 1987. – 160 с.
31. Королев, А. В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. В 2 ч. Ч.2. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке / А. В. Королев, Ю. К. Новоселов. – Саратов: изд-во Сарат. Ун – та, 1985. – 160 с.
32. Корчак, С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
33. Кравченко, Б. А. Оптимизация скорости шлифования / Б. А. Кравченко, Н.В. Носов // Справочник Инж. Журнал – 2005. – № 4. – С. 25 – 28.
34. Кравченко, Б. А. Теория формирования поверхностного слоя деталей машин при механической обработке / Б. А. Кравченко. – Куйбышев, КПИ, 1981. – 90 с.
35. Кремень, З. И. Высокоскоростное круглое шлифование желобов колец подшипников / З. И. Кремень, В. Н. Дучин, Е. И. Карпова // Абразивы. – 1974. – № 5. – С.1 – 6.
36. Кремень, З. И. Технология шлифования в машиностроении / З. И. Кремень, В. Г. Юрьев, А. Ф. Бабошкин; под общ. ред. З. И. Кремня. – СПб. : Политехника, 2007. – 424 с.
37. Кремень, З. И. Хонингование и суперфиниширование деталей / З. И. Кремень, И. Х. Стратиевский. – Л.: Машиностроение, 1988. – 137 с.
38. Кузнецов, И. П. Методы бесцентрового шлифования поверхностей тел вращения (деталей подшипников качения) / И. П. Кузнецов. – ВНИИП, М.: Специнформцентр, 1970. – 119 с.
39. Латышев, В. Н. Активация СОТС / В. Н. Латышев, А. Г. Наумов // Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – С.69-78.
40. Латышев, В. Н. Повышение эффективности СОЖ / В. Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1985. – 64 с.

41. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента / Т. Н. Лоладзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
42. Лурье, Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
43. Лурье, Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – М.: Машиностроение, 1969. – 172 с.
44. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 460 с.
45. Малышев, В. И. Шлифование с ультразвуковой очисткой и правкой абразивных кругов / В. И. Малышев, Б. М. Левин, А. В. Ковалев // СТИН. – 1990. – № 9. – С.22 – 26.
46. Маслов, Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.
47. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
48. Муцялко, В. И. Бесцентровое шлифование / В. И. Муцялко, А. Я. Братчиков. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 92 с.
49. Нетребенко, В. П. Прочность шлифовальных кругов / В. П. Нетребенко, Л.Н. Коротков. – М.: изд-во “Николь”, 1992. – 104 с.
50. Никитин, Ю. И. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента: учебное пособие / Ю. И. Никитин, Е. Б. Верник, В. Ф. Селех; под ред. Б. Н. Бакуля. – М.: Машиностроение, 1975 – 296 с.
51. Никифоров, И. П. Современные тенденции шлифования и абразивной обработки: Монография / И. П. Никифоров. – Старый Оскол; ООО «ТНТ», 2015. – 560 с.
52. Новоселов, Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / Ю. К. Новоселов. – Из. Сарат. Ун-та, 1979. – 232с.
53. Новоселов, Ю. К. Обеспечение стабильности точностей деталей при шлифовании / Ю. К. Новоселов. – Изд.: Сарат. Ун-та, 1988. – 126 с.

54. Носов, Н. В. Абразивная обработка деталей инструментами из СВС-материалов / Н. В. Носов. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2005. – 362 с.

55. Носов, Н. В. Исследование остаточных напряжений при внутреннем шлифовании / Н. В. Носов, В. А. Родионов, О. В. Родионова // Высокие технологии в машиностроении: тез. докл. Всерос. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием. – Самар. Гос. Техн. Ун-т. – Самара. – 2008. – С.157 – 158.

56. Носов, Н. В. Исследование процесса шлифования дорожки качения приборных подшипников / Н. В. Носов, Р. Г. Гришин, В. А. Родионов, А. А. Широнин, О. В. Родионова // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т.13. – №4 (3). – С.1161-1164.

57. Носов, Н. В. Исследование шероховатости дорожки качения приборного подшипника / Н. В. Носов, В. А. Родионов, О. В. Родионова // Высокие технологии в машиностроении: матер. Всерос. науч.-техн. интернет-конф. с междунар. участием. – Самара. – 2011. – С.145 – 147.

58. Носов, Н. В. К вопросу о формировании остаточных напряжений при шлифовании / Н. В. Носов. – Вестник Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2002. – № 15. – С.131 – 139.

59. Носов, Н. В. Моделирование остаточных напряжений при шлифовании дорожки качения внутренних колец подшипников / Н. В. Носов, В. А. Родионов, А. А. Широнин, О. В. Родионова // Актуальные проблемы разработки и использования компьютерных технологий в машиностроении: межвуз. сб. науч. ст. с междунар. участием / Самар. Гос. техн. ун-т. – Самара. – 2010. – С.187 – 190.

60. Носов, Н. В. Моделирование процесса шлифования / Н. В. Носов. – Вестник Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Техн. Науки. – 2002. – № 14. – С.77 – 82.

61. Носов, Н. В. Оптимизация скорости шлифования / Н. В. Носов, В. А. Родионов, О. В. Родионова // Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства: тр. III Международ. Науч.-техн. Конф. (Резниковские чтения). – Тольятт. Гос.ун-т. – Тольятти. – 2011. – С. 145 – 147.

62. Носов, Н. В. Повышение эффективности и качества абразивных инструментов путем направленного регулирования их функциональных показателей: дис. д-ра техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / Носов Николай Васильевич – Самара: [б.и.], 1997. – 452 с.

63. Носов, Н. В. Разработка и исследование процесса алмазного ленточного шлифования и полирования с целью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей машин: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Носов Николай Васильевич. – Куйбышев: Политехн. Ин-т им. В. В. Куйбышева, 1981. – 22 с.

64. Носов, Н. В. Технологические основы проектирования абразивных инструментов / Н. В. Носов, Б.А. Кравченко. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 257 с.

65. Носов, Н. В. Физико-механические свойства абразивных инструментов / Н. В. Носов, А. В. Рожнятовский // Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении: сборник тезисов докладов международной научно – техн. конф. / ИТОМ СНГ. – ИТОМ РБ. – Минск – 1994. – Ч.2. –С. 48 – 49.

66. Опарин, С. М. Улучшение эксплуатационных свойств шлифовальных кругов / С. М. Опарин, В. М. Опарин, Н. Ф. Майникова // Прогрессивные инструменты и методы обработки авиационных материалов. – Куйбышев. – 1989. – С.39 – 42.

67. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / под ред. Ю. М. Ковальчука. – М.: Машиностроение, 1984. – 288 с.

68. Островский, В. И. Теоретические основы процесса шлифования / В. И. Островский. – Л.: Ленингр.ун-т, 1981. – 144 с.

69. Оценка погрешности формы поверхности вращения после врезного бесцентрового шлифования / Е. А. Грушевский, Д. Г. Коновал, В. Г. Митрофанов, А. Г. Схиртладзе // СТИН. – 1997. – № 4. – С. 28 – 30.
70. Пахлитз, С. Влияние качества поверхности шлифовального круга на процесс шлифования / С. Пахлитз // Экспресс – инф.: Автоматические линии и металлорежущие станки. – 1975. – № 5 – С.1 – 21.
71. Подзей, В. А. Технологические остаточные напряжения / В. А. Подзей, А. М. Сулима, М. Н. Евстегнеев, Г. З. Серебрянников. – М.: Машиностроение. – 1973. – 216 с.
72. Полянский, Ю. В. Влияние физико-химических свойств абразивных зерен и обрабатываемого материала на процесс их взаимодействия при шлифовании / Ю. В. Полянский, Л. В. Худобин, Ю. М. Правиков // Трение и износ. – 1982. – № 3. – С. 537 – 544.
73. Полянский, Ю. В. Методы очистки качества СОЖ / Ю. В. Полянский, Е. А. Карев, Е. М. Булыжев // Станки и инструмент. – 1976. – № 10. – С.30–32.
74. Приборные шариковые подшипники: справочник / под ред. К.Н. Явленского. – М.: Машиностроение, 1981. – 351 с.
75. Приборы для измерения и контроля подшипников: справочник / Ю.Г. Городецкий, Б.И. Мухин, Э. П. Савенок., Н.А.Соломатин. – М., Машиностроение, 1973. – 256 с.
76. Пузанов, В. В. О взаимосвязях параметров круглого врезного шлифования и основных характеристик шлифовального круга / В. В. Пузанов // Совершенствование процессов резания. – Ижевск, Удмуртия, 1969. – С.132 – 142.
77. Родионов, В. А. Исследование толщины срезаемого слоя при шлифовании / В. А. Родионов, О. В. Родионова // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. – Самара. – Самар. Гос. Техн. Ун-т. – 2008. – С.163 – 164.

78. Родионов, В. А. Исследование шероховатости дорожки качения приборного подшипника / В. А. Родионов, О. В. Родионова // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. – Самара. – Самар. Гос. Техн. Ун-т. – 2010. – С.145 – 147.

79. 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, Издательство СамНЦ РАН, спец. вып. «Актуальные проблемы трибологии». – 2015. – С.231 – 234.

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

81. Родионова, О. В. Исследование остаточных напряжений, возникающих при шлифовании дорожки качения колец подшипников на жестких опорах / О. В. Родионова // В сб.: Высокие технологии в машиностроении. – Самара, Самар. Гос. Техн. Ун-т – 2012. – С.145 – 148.

82. Родионова, О. В. Моделирование процесса профильного шлифования / О. В. Родионова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – Самара, Издательство СамНЦ РАН, спец. Вып. «Актуальные проблемы трибологии». – 2015. – С.122 – 125.

83. Рыбаков, В. А. Состояние и перспективы развития абразивного инструмента / А. В. Рыбаков, А. М. Карташев. – Станки и инструменты. – 1972. - № 4. – С. 35 – 36.

84. Рыжов, Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – М.: Машиностроение, 1979. – 176 с.

85. Сагарда, А. А. Абразивно-алмазная обработка деталей машин / А. А. Сагарда, И. Х. Чеповецкий, Л. Л. Мишнаевский. – Киев: «Техника», 1974. – 180 с.

86. Саютин, Г. И. Выбор шлифовальных кругов / Г.И. Саютин. – М.: Машиностроение, 1976. – 64 с.
87. Семко, М. В. Шлифование фасонных поверхностей деталей машин / М. В. Семко, А. И. Грабченко. – Самара: Самарск. Книжное изд-во, 1993. – 207 с.
88. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: справочник / под. общ. ред. Л. В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
89. Справочник молодого шлифовщика / М. С. Наерман, Я. М. Наерман, А. Э. Исаков. – М.: Высшая школа, 1991. – 207 с.
90. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение. – 1985. – Т.1. – 656 с., Т.2. – 496 с.
91. Судариков, А. С. Управление съемом припуска при шлифовании / А. С. Судариков, Ю. А. Бояршинов, М. Ф. Политов. – Вестник машиностроения. – 1977. – № 9. – С.55 – 58.
92. Суслов, А. Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
93. Табенкин, А. Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / А. Н. Табенкин, С. Б. Тарасов, С. Н. Степанов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. – 2007. – 136 с.
94. Филимонов, Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с.
95. Филимонов, Л. Н. Стойкость шлифовальных кругов/ Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1973. – 134 с.
96. Филин, А. Н. Шлифование фасонных поверхностей деталей машин / А. Н. Филин, Н. В. Носов, В. П. Рахчеев. – Самар. гос. техн. ун-т. – Самара, 1994. – 57 с.
97. Филькин, В. П. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования / В. П. Филькин, И. Б. Колтунов. – М.: Машиностроение, 1971. – 204 с.

98. Худобин, Л. В. Минимизация засаливания шлифовальных кругов / Л. В. Худобин, А. Н. Унянин. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 298 с.
99. Худобин, Л. В. Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании / Л. В. Худобин. – М.: Машиностроение, 1971. – 214 с.
100. Чередниченко, Г. И. Физико-химические и теплофизические свойства смазочных материалов. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
101. Черепашков, А. А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении / А. А. Черепашков, Н. В. Носов. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с.
102. Чигарев, А. В. ANSYS для инженеров: справочное пособие / А. В. Чигарев, А. С. Кравчук, А. Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
103. Швидак, И. А. Шлифование фасонных деталей / И. А. Швидак, А. Н. Филин. – Самара, 1995. – 217с.
104. Эльянов, В. Д. Прогрессивные режимы шлифования / В. Д. Эльянов. – ЦНИИТЭИавтопром. – Москва, 1989. – 86 с.
105. Эльянов, В. Д. Точность и качество поверхности при обработке абразивными инструментами / В. Д. Эльянов. – М.: Машиностроение, 1977. – 48 с.
106. Якимов, А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 176 с.
107. Ящерицын, П. И. Повышение качества шлифованных поверхностей и режущих свойств абразивно-алмазного инструмента / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев. – Минск: Наука и техника, 1972. – 480 с.
108. Ящерицын, П. И. Технологическая наследственность в машиностроении / П. И. Ящерицын, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Минск, Наука и техника, 1977. – 255 с.
109. Ящерицын, П. И. Шлифование металлов / П. И. Ящерицын, Е. А. Желнерович – Минск: Наука и техника, 1970. – 464 с.

110. Astakhov, V. P. Metalworking Fluids (MWFs) for Cutting and Grinding / V. P. Astakhov, S. Joksch // Woodhead Publishing, 2012. – 424 p.

111. Cakir, O. Selection of Cutting Fluids in Machining Processes / O. Cakir, A. Vardimeden, T. Azben, E. Kilickap // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – V.25. – № 2. – 2007. – P. 99-102.

112. Davisson J. F. Cutting fluids and coolants what to do with residue // Tooling and Production. – 1995. – № 11. – P.45 – 51.

113. Fitsh, B. Application and Benefits Magnetic Filtration / B. Fitsh // Magazine Newsletters. – 2015. – P.1/2 – 1/10.

114. Fully automatic coolant filtration systems // American Machinist. – 1994. – 138. – № 360. – P.84.

115. Haberlein, D. Selecting a Cleaning System for Small Parts / D. Haberlein // Production Machining. – 2015. – P. 1/2 – 2/2.

116. Hamlin M. J. Sedimentation studies / M. J. Hamlin, T. H. Y. Tebbutt // Surveyor. – 1990. – Vol. 135 (4065). – P.42.

117. Larkin, C. Developments for Higher Precision in Ultrasonic Cleaning / C. Larkin // Production Machining. Magazine Newsletter. – 2015. – P. 1/3 – 3/3.

118. Morris F. T. Centralized coolant systems // Mass Production. – 1995. – 7. – P.35 – 39.

119. Zelinski P. Keep you collant in circulation // Mod. Mach. Shop. – 1998. – 70. – № 12. – P.96-98.

Электронные ресурсы:

120. Каталог измерительных микроскопов: Четыре глаза. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.4glaza.ru/catalogue/Microscopes>.

121. Лоскутов, А. А. Новейшее оборудование для измерения шероховатости поверхности [Электронный ресурс] / А. А. Лоскутов, А. В. Золотов // Мир измерений. – М.: РИА «Стандарты и качество». – 2010. – № 4. - Режим доступа: <http://elibrary.ru/id=18036998>.

122. Порошин, В. В. Автоматизированная измерительная система на базе высокочастотного профилометра TALYSTEP для контроля эталонов

шероховатости поверхности [Электронный ресурс] / В. В. Порошин, Д. Ю. Богомолов, А. Г. Костюк // Стин. – М.: ООО «Стин». – 2010. – № 3. – Режим доступа: <http://elibrary.ru/id=15635194>.

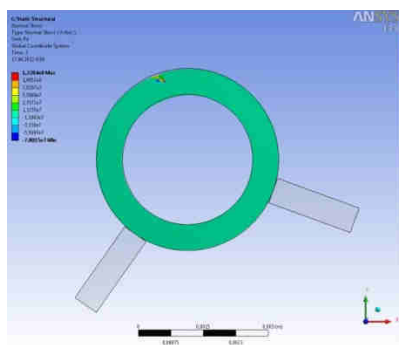
Патенты:

123. Патент 2062208, Россия, МПК 6 В 24 В 1/00. Способ шлифования деталей /А. Н. Филин, Н. В. Носов, А. П. Кузнецов, Ю. Н. Кузьмин // БИ.1996.

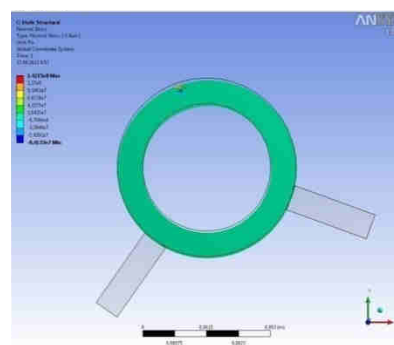
124. Патент 2413179, МПК G01B11/30 (2006.01) G01N21/93 (2006.01) Способ контроля шероховатости поверхности изделия /А. Д. Абрамов, А. И. Никонов, Н. В. Носов // БИ. 2009.

125. Патент 2228246, Россия, МПК7 В 24 В 7/16. Прогрессивные методы бесцентрового шлифования / Гебель И. Д., Нефедов А. И., Свиткин М. М. –. 2004.

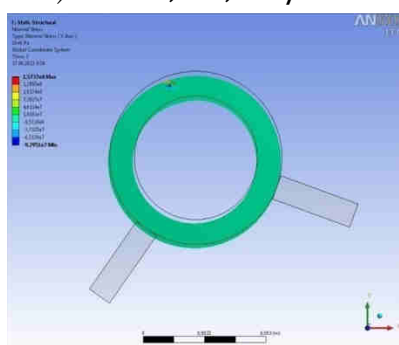
Изолинии эквивалентных напряжений



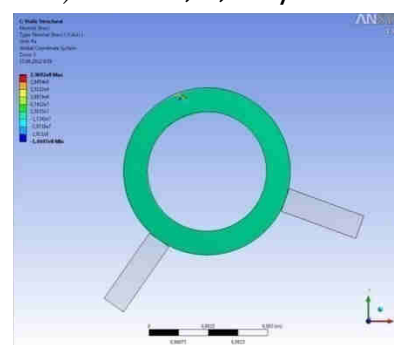
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$

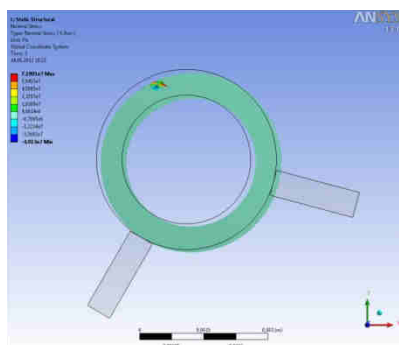


в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

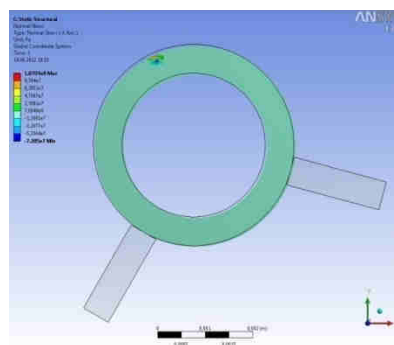


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

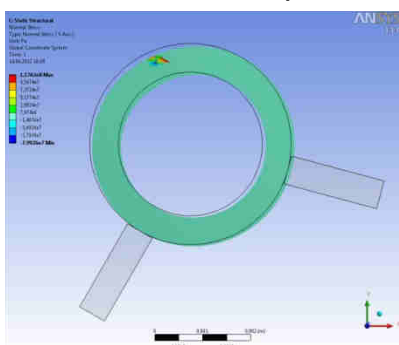
$\alpha = 20^\circ$



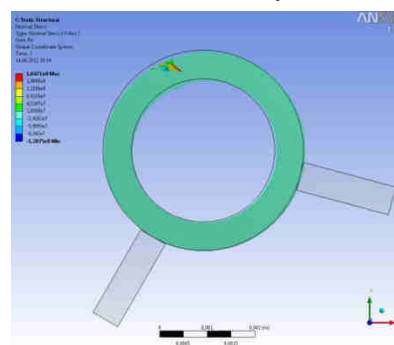
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$

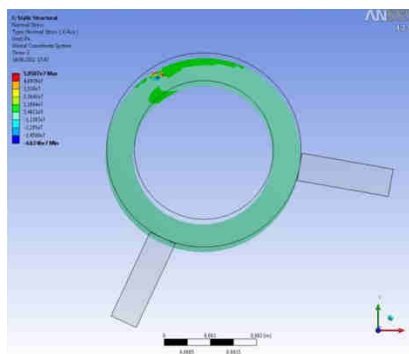


в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

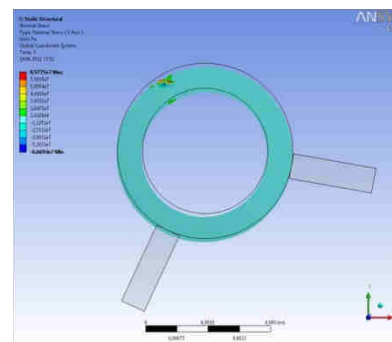


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

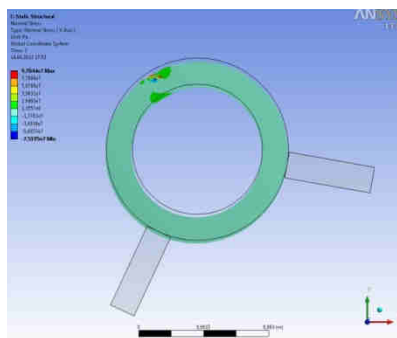
$\alpha = 15^\circ$



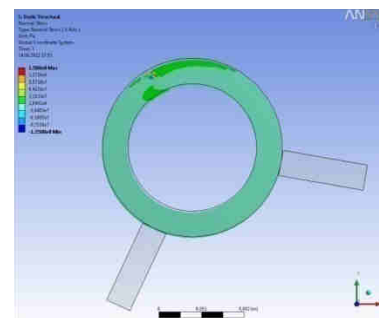
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$

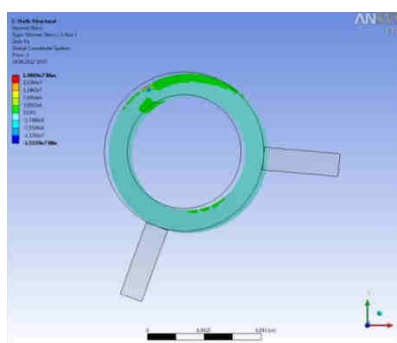


в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

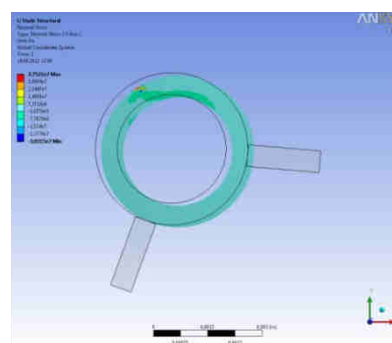


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

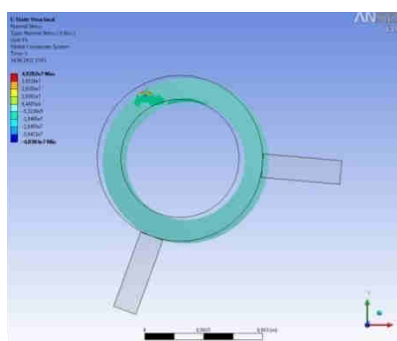
$\alpha = 10^\circ$



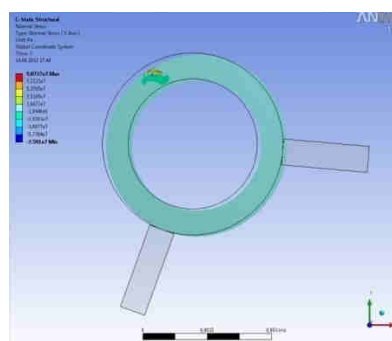
а) $S = 0,15, \text{мм/мин}$



б) $S = 0,3, \text{мм/мин}$



в) $S = 0,45, \text{мм/мин}$

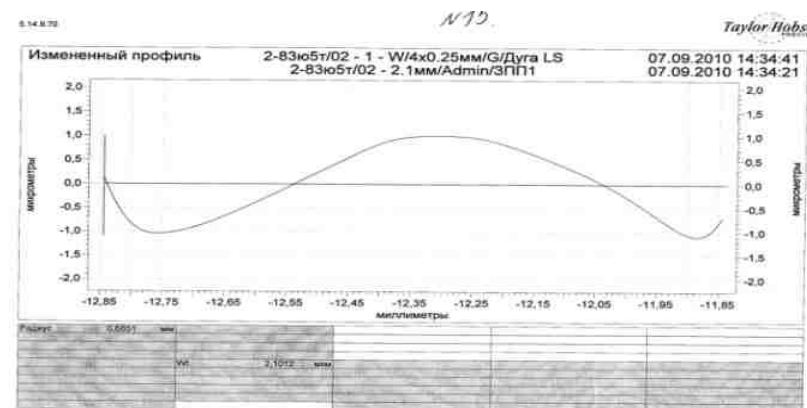
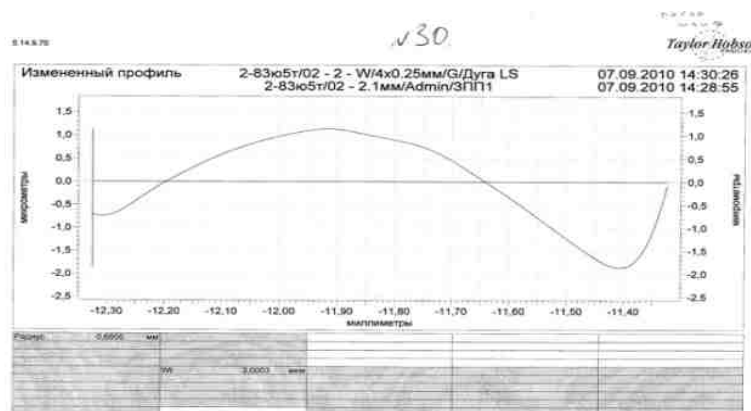


г) $S = 0,6, \text{мм/мин}$

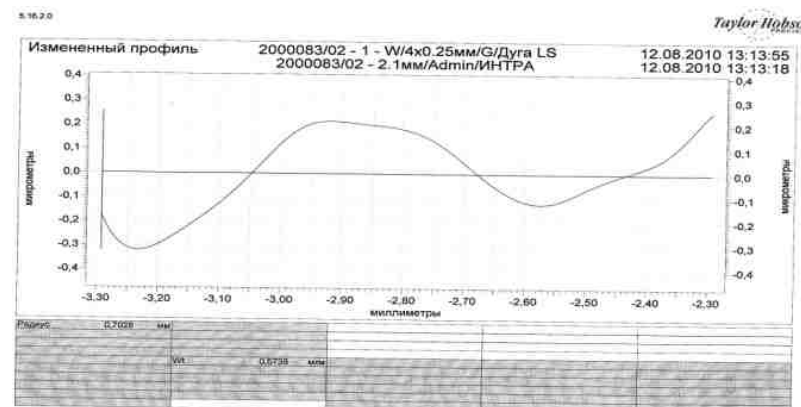
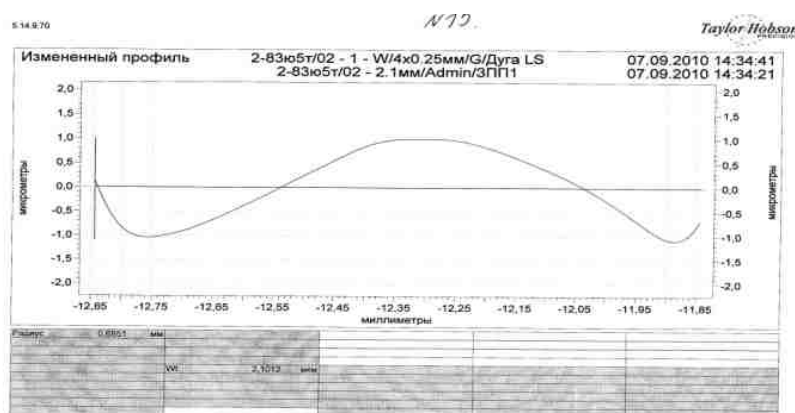
$\alpha = 5^\circ$

Типичные профилограммы профиля дорожек качения внутренних колец подшипников

(материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол $\beta = 105^\circ$; угол $\alpha = 5^\circ \div 10^\circ$; $V_k = 34,4$ 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 x 8x 200 91A F320 M 9 V2 2; правящий инструмент: алмазный карандаш Ц2)



а) масляная СОЖ (ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%)

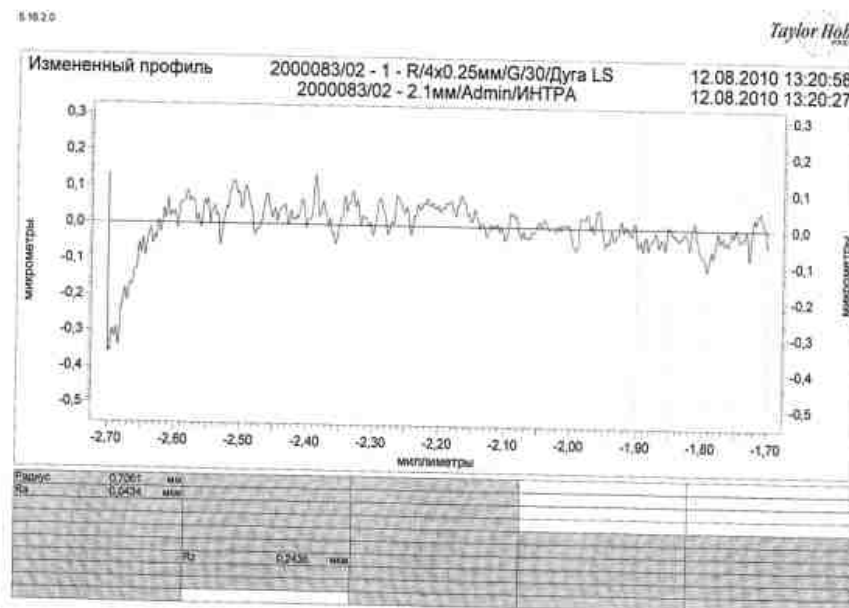


б) водоземulsionная СОЖ (3% – ная эмульсия APC – 21M)

Приложение 3

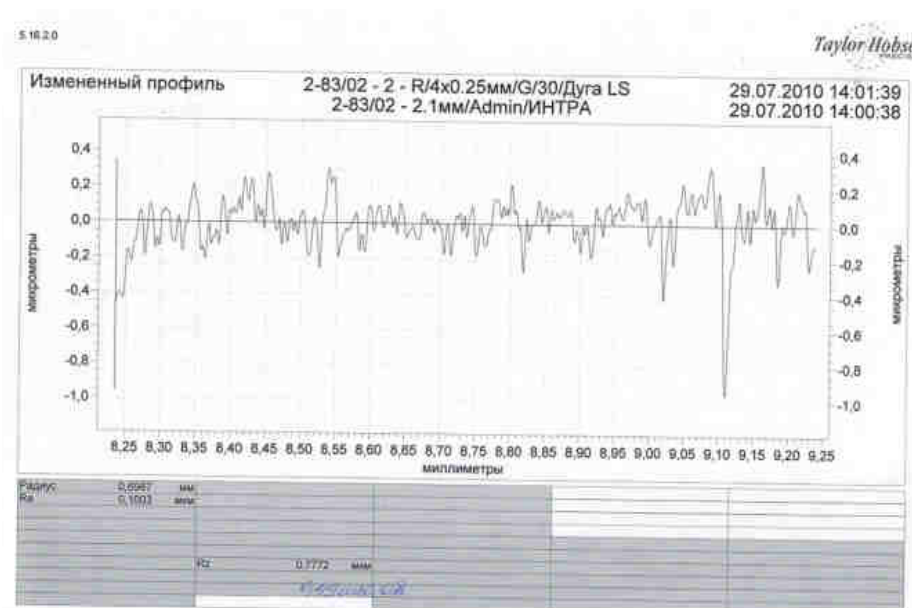
Типичные профилограммы поверхности дорожки качения внутренних колец подшипников

(материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол $\beta = 105^\circ$; угол $\alpha = 5^\circ \div 10^\circ$; $V_k = 34,4$ 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 x 8x 200 91A F320 M 9 V2 2; правящий инструмент: алмазный карандаш Ц2)



а) масляная СОЖ

(ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%)

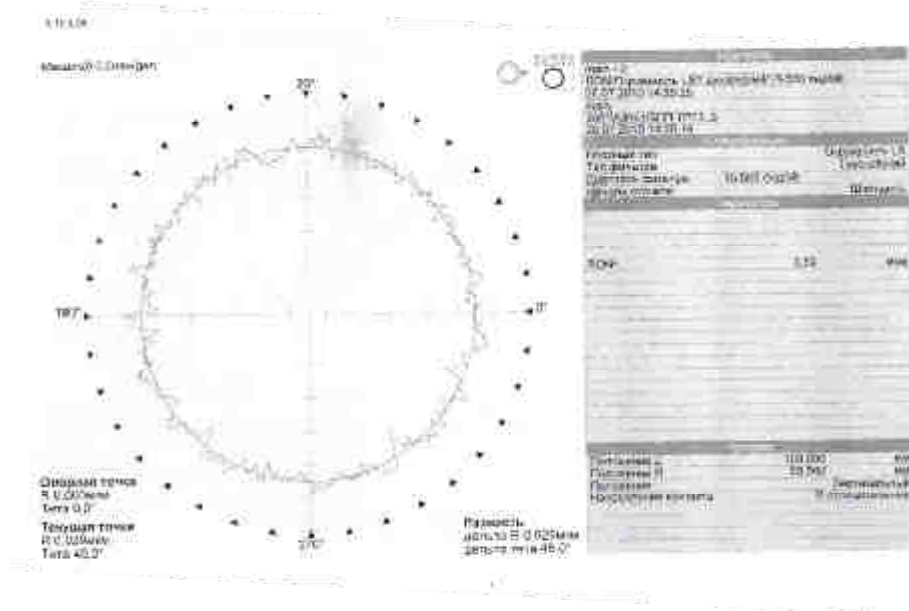


б) водоземulsionная СОЖ

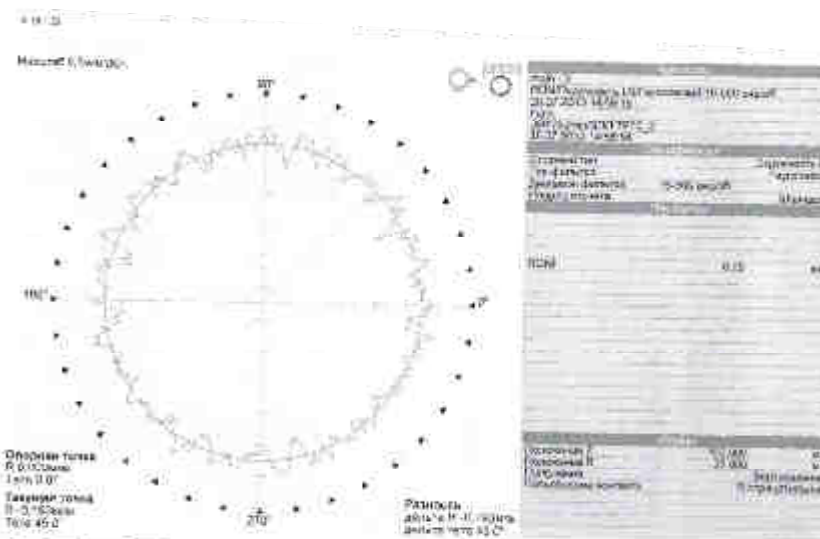
(3% – ная эмульсия APC – 21M)

Типичные круглограммы дорожек качения внутренних колец подшипников

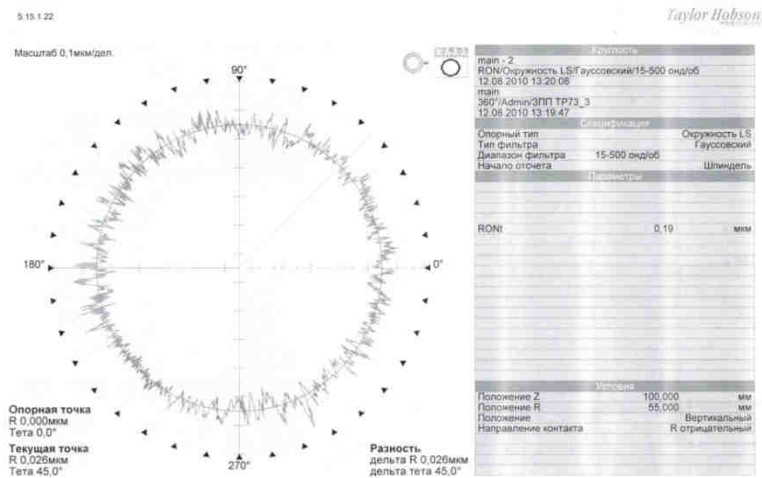
(материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол $\beta = 105^\circ$; угол $\alpha = 5^\circ \div 10^\circ$; $V_k = 34,4$ м/с; $V_{черн} = 40$ м/мин; $V_{чист} = 33$ м/мин; $S_{черн} = 0,9$ мм/мин; $S_{чист} = 0,2$ мм/мин; круг 1–355 x 8x 200 91A F320 M 9 V2 2; правящий инструмент: алмазный карандаш Ц2; масляная СОЖ – ИС – 12 – 97%, олеиновая кислота – 3%; водоэмульсионная СОЖ – 3% – ная эмульсия APC – 21M)



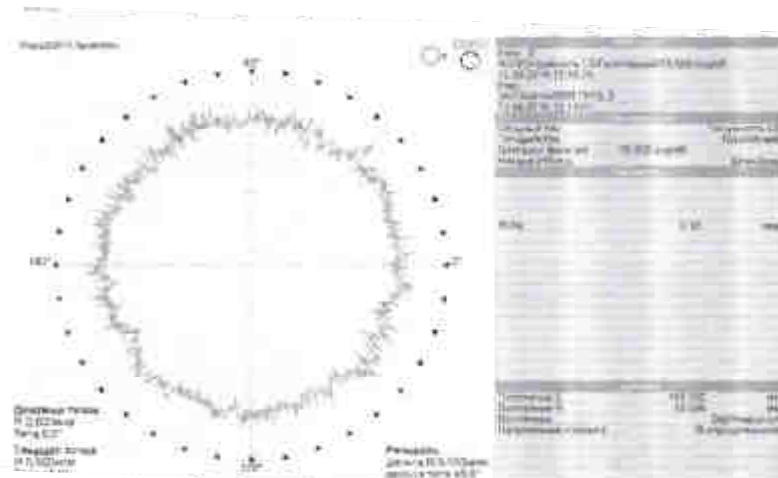
а) масляная СОЖ



б) водоэмульсионная СОЖ



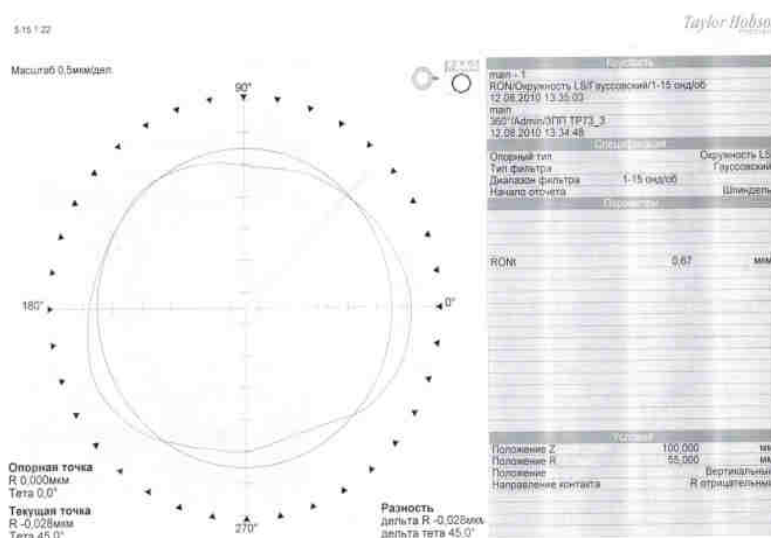
а) масляная СОЖ



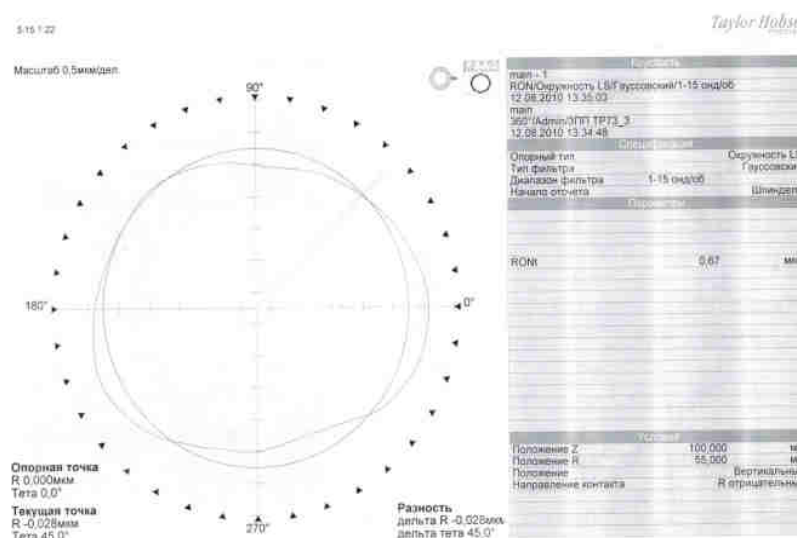
б) водоэмульсионная СОЖ

Типичные круглограммы дорожек качения внутренних колец подшипников при различной поперечной подаче

(материал кольца подшипника – сталь ШХ15, HRC 62 – 65; угол $\beta = 105^\circ$; угол $\alpha = 5^\circ \div 10^\circ$; $V_k = 34,4$ м/с; $V_{черн} = 40$ м/мин; $V_{чист} = 33$ м/мин; $S = 0,9; 0,6; 0,45; 0,2$ м/мин, круг 1–355 x 8x 200 91A F320 M 9 V2 2; правящий инструмент: алмазный карандаш Ц2; водоэмульсионная СОЖ – 3% – ная эмульсия APC – 21M)



а) $S = 0,45$ мм/мин



б) $S = 0,6$ мм/мин

Главный инженер ООО «Завод приборных подшипников»

Ефимов С.П.

«25» октября 2016 г.

АКТ

Опытно-промышленной проверки и внедрения результатов диссертационной работы О.В. Родионовой, представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук

Настоящий акт подтверждает, что на ООО ЗПП проведена опытно-промышленная проверка и внедрены следующие результаты кандидатской диссертации Родионовой Ольги Владимировны:

1. Проведена опытно-промышленная проверка применения водоземulsionной СОЖ на операции профильного шлифования дорожки качения приборного подшипника №2000083S вместо масляной СОЖ и техники очистки СОЖ от механических примесей.

Операция шлифования внутренних колец подшипников осуществлялась на круглошлифовальном станке модели «Брайант М-1» на жестких опорах, шлифовальным кругом следующих характеристик 91AF320M9V22 (91A M40 C19K22). При этом определялась производительность процесса и геометрические параметры поверхности: шероховатость, волнистость, гранность, отклонение от профиля и отклонение от круглости, наличие на поверхности прижогов и дефектов. Дефекты на поверхности определялись оптико-электронным методом. Геометрические параметры в лаборатории завода.

При обработке с масляной СОЖ общее технологическое время составило $t_{\text{шго}}=0,53$ мин (32 с), на поверхности наблюдались дефекты до 5 %, прижоги не наблюдались. Брака по допустимым геометрическим параметрам дорожки качения нет.

При обработке водной СОЖ общее технологическое время составит $t_{\text{шго}}=0,24$ мин (15 с), на поверхности наблюдались дефекты до 1,5%, прижоги не наблюдались. Брака по допустимым геометрическим параметрам дорожки качения нет.

Таким образом, производительность процесса обработки профиля дорожки качения подшипников при использовании водной СОЖ вместо масляной повысилась в 1,7- 2,0 раза.

Применение водной СОЖ повышается отклонение от круглости на 10-15 %, шероховатость поверхности на 15-20 %, высоту волнистости и гранности на 8-10 %, в тоже время отклонение от профиля снижается с 2,1 мкм до 1,3 мкм, т.е. 1,6 раза.

2. Источниками экономической эффективности использования результатов диссертационной работы являются:

- увеличение периода правки шлифовальных кругов и износа правящих инструментов с 20 деталей до 30 деталей, за счет повышения угла наклона правящего инструмента с 0° до 15°;
- уменьшение расхода шлифовальных кругов с 8 до 6, за счет увеличения периода правки и уменьшения врезной подачи при правке;
- интенсификация режимов шлифования и уменьшение машинного и штучного времени, за счет применения водной СОЖ;
- снижение брака по дефектам поверхности при обработке колец подшипников, за счет использования водной СОЖ и новой системы очистки водной СОЖ.

3. Общий экономический эффект на 1 станок в год достигается за счет интенсификации режимов обработки, уменьшения расхода абразивного и алмазного инструмента и составляет 216180 руб .

4. Внедрен оптико-электронный комплекс и специальное программное обеспечение на операции контроля дефектов поверхности и параметров шероховатости после операции шлифования дорожки качения приборных подшипников.

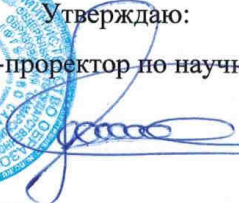
5. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по применению водной СОЖ и контролю параметров шероховатости и дефектов поверхности приборных подшипников на оптико-электронном информационно-измерительном комплексе.

Инженер-технолог ОГТ

Широтин А.А.

25.10.2016

Утверждаю:

первый проректор-проректор по научной работе СамГТУ
д.т.н., профессор  Ненашев М. В.



Акт

Применение в учебном процессе результатов исследования кандидатской диссертации Родионовой О.В. на тему: «ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ЖЕСТКИХ ОПОРАХ».

Мы, нижеподписавшиеся, члены методической комиссии по направлению 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет»: заведующий кафедрой «Технология машиностроения», руководитель магистерской программы «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» д.т.н., профессор Носов Н.В., председатель методической комиссии факультета к.т.н., доцент Дмитриев В.А. составили настоящий акт об использовании в учебном процессе результатов исследований на тему: «ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ПРОФИЛЬНОГО ШЛИФОВАНИЯ ДОРОЖЕК КАЧЕНИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ НА ЖЕСТКИХ ОПОРАХ» при изучении дисциплин: «Научные основы технологии машиностроения», «Технологическое обеспечение качества изделий».

Эффект от использования состоит в повышении уровня знаний и качества подготовки магистров по направлению 15.04.05 – Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Председатель методической комиссии факультета ФММТ	Руководитель магистерской программы 15.04.05– Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств
к.т.н., доцент  В.А. Дмитриев	д.т.н., проф.  Н.В. Носов