

*На правах рукописи*



**ВАЙНЕР Леонид Григорьевич**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ДВУСТОРОННЕЙ  
ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Тихоокеанский государственный университет» (г. Хабаровск)

Научный консультант: заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, директор научно-образовательного центра нанотехнологий Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс (г. Орел) **Степанов Юрий Сергеевич**

Официальные оппоненты:

**Зубарев Юрий Михайлович**, заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры "Технологические машины и оборудование автоматизированных производств" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

**Козлов Александр Михайлович**, почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Липецкий государственный технический университет»

**Бишутин Сергей Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автомобильный транспорт» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Брянский государственный технический университет»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)» /Университет машиностроения/

Защита состоится 31 января 2014 г. в 14<sup>00</sup> на заседании диссертационного совета Д212.182.06 ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» в корпусе №6 по адресу: Россия, г. Орел, ул. Московская, 34, ауд. 207.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 302020, Россия, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, Госуниверситет – УНПК.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс».

Автореферат разослан 5 декабря 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Василенко Ю. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Одним из наиболее эффективных способов механической обработки деталей, имеющих оппозитные торцовые поверхности, в настоящее время является двусторонняя торцешлифовальная обработка (ДТШО), осуществляемая как на отечественном, так и импортном оборудовании.

Возможности получения высокой точности и производительности заложены в самой принципиальной схеме обработки при совмещении двух технологических переходов и непрерывности потока заготовок. Поэтому ДТШО активно применяется в массовом и крупносерийном производстве в таких определяющих развитие экономики страны отраслях промышленности как автотракторная, двигателестроение, сельскохозяйственное машиностроение, подшипниковое производство для высокоточной обработки колец и роликов подшипников качения, в том числе железнодорожных, устанавливаемых в качестве опор колесных пар, крестовин карданных валов, шатунов, дисков сцепления, поршневых колец, втулок и пальцев гусеничных машин. Требования к точности торцовых поверхностей, являющимися основными конструкторскими базами и технологическими базами при последующем круглом наружном, внутреннем и бесцентровом шлифовании, постоянно растут, т. к. в значительной степени влияют на качественные показатели изделия в целом.

В настоящее время решены ряд научных и производственных проблем, таких как выбор характеристик шлифовальных кругов (ШК) и диапазона режимов шлифования, обеспечивающих необходимый набор физико-механических показателей поверхностного слоя, отсутствие прижогов, необходимую шероховатость обработанных поверхностей. Вместе с тем полноценному проявлению потенциальных возможностей процесса ДТШО мешает недостаточная изученность условий формирования обрабатываемых поверхностей, отсутствие теоретической и методологической научной базы для исследований, моделирования и управления процессом.

Несмотря на простоту номинальной кинематической схемы, реальный процесс формообразования отличается сложностью и наличием многочисленных факторов влияния – геометрических, кинематических, динамических, тепловых, которые необходимо учитывать в комплексе при проектировании данной технологической системы и прогнозировании точности.

ДТШО является одной из разновидностей процесса шлифования, и потому здесь проявляются его общие закономерности. Вместе с тем, проектируя процесс обработки, включая выбор технологических режимов и параметров настройки, геометрических, кинематических и упругих характеристик станка, параметров инструментов и их оптимизацию, необходимо комплексно учитывать системные особенности их влияния на выходные характеристики процесса. Для этого требуется система обобщенных критериальных оценок качества процесса формообразования - основного функционального процесса в технологической системе, определяющего выходные показатели точности обработки и осуществляемого формообразующей системой станка.

Из вышеизложенного следует, что существует острая необходимость в обосновании и реализации методологической платформы, на основе которой возможна разработка научно обоснованных рекомендаций по наладке станков, выбору управляющих параметров для обеспечения качества формообразования деталей.

**Научная проблема,** решаемая в работе, заключается в методологическом обеспечении качества процесса формообразования при торцешлифовальной обработке в условиях крупносерийного и массового производства.

### **Цель работы.**

Совершенствование процесса двусторонней торцешлифовальной обработки на основе технологического управления процессом формообразования, направленного на повышение точности деталей и формоустойчивости шлифовальных кругов.

**Объектом исследования** является процесс формообразования при двусторонней торцешлифовальной обработке.

**Предметом исследования** являются закономерности и взаимосвязи в процессах прямого и обратного формообразования при двусторонней торцешлифовальной обработке.

### **Область исследований.**

Содержание диссертации соответствует областям исследований паспорта специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки ...» и «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки».

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать классификацию и способ идентификации вариантов реализации ДТШО на основе схемно-конструктивных и факторных признаков;
- предложить концептуальный подход к представлению формообразующей системы поточной шлифовальной обработки;
- установить научно-обоснованные принципы технологического управления процессом формообразования при ДТШО;
- создать методологическую и модельную среду процесса формообразования при ДТШО, включая модели формирования технологического пространства, трансформации технологического пространства при шлифовании потока заготовок, динамического реального формообразования обрабатываемых поверхностей в процессе съема припуска, профилирования и правки ШК;
- на основе разработанных моделей создать программный комплекс виртуальной ДТШО для прогнозирования результатов формообразования и выбора управляющих параметров;
- провести экспериментальные исследования связи кинематических, силовых, деформационных факторов формообразования с управляющими параметрами наладки станков и с погрешностями обработанных поверхностей, проверить корректность полученных теоретических зависимостей и моделей;
- разработать алгоритм и методику определения управляющих параметров настройки станка и режимов шлифования, исходя из критериальных условий качества формообразования;
- разработать метод оперативной диагностики процесса и направленной коррекции управляющих параметров настройки станка и режимов шлифования;
- предложить конструкторско-технологические решения по совершенствованию условий формообразования.

**Методы и достоверность исследования.** Теоретические исследования выполнялись с использованием основных положений системного анализа, аналитической и дифференциальной геометрии, векторной алгебры, математического и компьютерного моделирования, фундаментальных основ теории шлифования материалов, формообразования поверхностей и базирования. Экспериментальные исследования прове-

дены в лабораторных и производственных условиях с применением станочного оборудования и современных измерительных систем. Обработка результатов экспериментов проводилась средствами вычислительной техники с использованием методов планирования эксперимента и регрессионного анализа.

Достоверность исследования обеспечивается разработкой математических моделей на основе реальных данных, используемых на практике ДТШО, и подтверждается соответствием теоретических и экспериментальных результатов, а также их согласованием с имеющимися отдельными результатами других авторов.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Классификация и идентификация способов ДТШО по схемно-конструктивным и факторным признакам.
2. Концепция взаимного континуального формообразования потока заготовок и абразивного инструмента.
3. Комплекс методик, математических и алгоритмических моделей формирования и трансформации технологического пространства, динамического формообразования обрабатываемых поверхностей, их исходной генерации в процессе правки.
4. Установленные взаимосвязи геометрических, кинематических, упруго-силовых факторов с параметрами наладки станков и точностью обработки.
5. Принципы управления процессом ДТШО и методический подход к синтезу управляющих параметров с учетом особенностей вариантов реализации процесса.
6. Метод производственной коррекции управляющих параметров настройки и режимов для обеспечения наиболее высокой точности в данных условиях обработки.
7. Конструкторско-технологические решения по совершенствованию формообразующей системы станка, обеспечивающие повышение точности и производительности процесса ДТШО.

#### **Научная новизна результатов диссертационной работы:**

1. Предложена классификация и способ идентификации вариантов реализации ДТШО на основе схемно-конструктивных и факторных идентификаторов, позволяющие установить компоненты и расчетную схему реального формообразования.
2. Предложен и научно обоснован новый концептуальный подход к представлению поточной шлифовальной обработки в виде двух взаимосвязанных процессов динамического формообразования: прямого – заготовок, и обратного – абразивного инструмента, вскрывающий закономерности развития ДТШО;
3. Предложены, научно обоснованы и реализованы принципы управления процессом формообразования при ДТШО, обеспечивающие получение требуемой точности обработки:
  - обеспечение рациональной формы технологического пространства;
  - реализация на основе установленных взаимосвязей требуемых кинематических характеристик движения заготовок;
  - обеспечение формоустойчивости производящих поверхностей ШК под воздействием потока заготовок;
  - обеспечение условия постоянства контакта заготовки и ШК;
  - ограничение системных динамических смещений заготовок и ШК.
4. Получены теоретические зависимости для определения геометрических, силовых и упругих характеристик технологического пространства, на основе которых разработаны модели его формирования и трансформации, с учетом вариации формы ШК, траектории движения подачи, асимметрии условий обработки для случаев обработки потока и одиночной заготовки.

5. Разработана обобщенная модель реального динамического формообразования обрабатываемых поверхностей в процессе съема припуска с учетом действия выявленных доминирующих факторов, позволяющая установить совокупность управляющих параметров для обеспечения требуемых показателей точности.

6. На основе расчетно-экспериментальных исследований ДТШО: установлены взаимосвязи кинематических, силовых, деформационных характеристик с параметрами наладки станков и их влияние на погрешности обработанных деталей; выявлены доминирующие факторы, оказывающие влияние на показатели точности обработки; определены области значений параметров вращательного движения заготовки при обработке для достижения требуемой точности по параметрам биения и формы торцов при минимизации шероховатости обработанных поверхностей.

#### **Практическая значимость и реализация результатов работы.**

1. Разработанный программный комплекс виртуальной ДТШО позволяет оценить влияние факторов, обусловленных процессами различной скорости, на формирование топографии и погрешностей обработанных поверхностей, что делает возможным прогнозирование точности обработки для данных условий шлифования.

2. Даны практические рекомендации по наладке станков на основе разработанных алгоритмов и методик определения параметров настройки положения ШК и режимов шлифования, исходя из заданных показателей качества прямого и обратного формообразования.

3. Предложен метод вибродиагностики процесса ДТШО для оперативной направленной коррекции параметров настройки станка, обеспечивающий получение наиболее высокой в данных производственных условиях точности обработки.

4. Предложены конструкторско-технологические решения по совершенствованию условий формообразования для повышения точности обработки, защищенные семью патентами РФ.

5. Разработаны методика и устройства профилирования и правки ШК, обеспечивающие формирование требуемого технологического пространства и заданных параметров геометрической модификации профиля ШК.

Результаты исследования внедрены или приняты к внедрению на следующих предприятиях: ЕПК – Москва («Московский подшипник»), ЕПК - Волжский (Волжский подшипниковый завод), КПК (г. Курск).

Работа включена в тематику приоритетных исследований Программы стратегического развития Тихоокеанского государственного университета на 2012-2016 г.

Материалы диссертации используются в учебном процессе ТОГУ при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

#### **Апробация работы.**

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на 34 международных и всероссийских симпозиумах и конференциях, в том числе: «The second international symposium on promotion of scientific and technological progress in the Far East» (Harbin, P.R.C., 1992), «Синергетика. Самоорганизующиеся процессы в системах и технологиях» (Комсомольск-на-Амуре, 1998), «Современные проблемы машиностроения» (Томск, 2010), «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения» (Брянск, 2011), Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Symposium (Хабаровск, 2011), «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» (Орел, 2011, 2012), «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации совре-

менного машиностроения и металлургии» (Липецк, 2012), «Научные технологии в машиностроении и авиадвигателестроении» (Рыбинск, 2012), «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (Москва, 2012), «Машиностроение – основа технологического развития России» (Курск, 2013) и др.

Диссертационная работа в полном объеме обсуждена и рекомендована к представлению к защите на расширенных заседаниях кафедр «Информационное обеспечение автоматизированных технологических комплексов» ДГТУ (Ростов-на-Дону), «Технологическая информатика и информационные системы» ТОГУ (Хабаровск), на заседаниях межкафедрального семинара ЮЗГУ (Курск) и НТС ЭНИМС (Москва).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 80 печатных работ. В их число входят: 18 - в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 11 без соавторов; 2 монографии, 7 патентов на изобретения и полезные модели, 1 авторское свидетельство на изобретение, 6 свидетельств на регистрацию программы для ЭВМ. Общий объем публикаций по теме работы составляет свыше 41 печ. л., из них соискателю принадлежит свыше 32 печ. л.

**Личный вклад автора:** в диссертации и публикациях представлены научные результаты, в получении которых личный вклад соискателя был доминирующим (постановка проблемы, постановка и проведение эксперимента, исследование, обработка и анализ экспериментальных результатов, разработка моделей и алгоритмов, получение аналитических выражений и др.). С участием соавторов проведены экспериментальные исследования факторов, определяющих качество формообразования и точность ДТШО, в лабораторных и производственных условиях сектора торцевшлифовальных станков МСКБ, МосЗАЛиСС, ОАО «Московский подшипник», ВПЗ; разработаны компьютерные программы, предложены отдельные конструкторско-технологические мероприятия и способы диагностики процесса ДТШО.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 175 наименований, и приложений. Работа изложена на 358 страницах, содержит 184 рисунка и 29 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, изложены основные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** содержит обзор литературных данных, кратко отражающий опубликованные материалы по основным направлениям диссертации.

Фундаментальные положения теории шлифования материалов изложены в трудах отечественных и зарубежных ученых Глейзера Л.А., Корчака С.Н., Лурье Г.Б., Маслова Е.Н., Михелькевича В.Н., Филимонова Л.Н., Худобина Л.В., Ящерицына П.И., Matsui S., Salhe E., Smith D., Vogt H.R., Werner G., Konig W., Buttery T.C. и др.

Теоретические и прикладные вопросы шлифовальной обработки получили развитие в более поздних работах Аршанского А.А., Бабичева А.П., Безъязычного В.Ф., Бишутина С.Г., Бржозовского Б.М., Евсеева Д.Г., Захарова О.В., Зубарева Ю.М., Козлова А.М., Колтунова И.И., Королёва А.В., Кременя З.И., Кузнецова А.М., Мишнаевского Л.Л., Новоселова Ю.К., Носенко В.А., Романова В.Л., Старкова В.К., Степанова Ю.С., Суслова А.Г., Шумячера В.М., Филина А.Н., Эльянова В.Д. и др.

В большинстве работ по двустороннему торцевшлифованию рассматривается влияние отдельных факторов на выходные характеристики процесса, работы носят

преимущественно экспериментальный характер. Тем не менее, наблюдается возрастающий интерес исследователей к ДТШО и расширение круга рассматриваемых проблем, связанных с повышением его эффективности. Наиболее значимыми являются работы Байора Б.Н., Гохвата Л.Я., Гурьянихина В.Ф., Денисова А.С., Евстигнеева А.Д., Зарецкого А.В., Козлова Б.А., Кузьменковой Ф.М., Рахчеева В.Г., Сухарева В.М., Шахновского С.С., Ящерицына П.И., Ku C. H., Lin Z. H., Vogt H.R., Wick C. Наиболее широкий охват проблем, связанных с точностью обработки содержится в работах Шахновского С.С.

Проведенный анализ работ в области ДТШО показал, что в настоящее время отсутствует обобщенное представление процесса, недостаточно развита теория ДТШО, комплексно учитывающая ее системные особенности, отсутствуют научно обоснованные многофакторные многокритериальные модели процессов формообразования с учетом сопутствующих процессов; как следствие, ограничена возможность прогнозирования выходных показателей точности под влиянием доминирующих факторов, рекомендации по настройке ДТШС носят противоречивый характер.

Теоретические вопросы технологического формообразования поверхностей рассмотрены в работах Литвина Ф.Л., Базрова Б.М., Портмана В.Т., Решетова Д.Н., Гречишников В.А., Ивахненко А.Г., Лашнева С.И., Тарапанова А.С., Харламова Г.А.

Большинство моделей формообразования построено для лезвийной и абразивной обработки с точечным и линейным контактом инструмента и заготовки, при этом объектом формообразования является заготовка при постоянной функции инструмента. Большая степень физического подобия модели и реального процесса может быть обеспечена при учете текущего врезания поверхности инструмента в материал заготовки, зависящего от фазовых характеристик процесса съема припуска и текущих переменных параметров формообразующей системы.

Дальнейшее развитие ДТШО во многом определяется возможностями эффективного управления процессом реального формообразования с учетом действия доминирующих факторов. На основании проведенного анализа литературных данных и степени разработанности темы исследования сформулированы приведенные выше цели и задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** рассмотрены основные положения методологии технологического формообразования применительно к поточной ДТШО, обоснован концептуальный подход к представлению ДТШО как процесса взаимного континуального формообразования, построены обобщенные функции формообразования.

ДТШО рассматривается с учетом ее системных особенностей, таких как: переменность геометрии текущего формообразующего профиля инструмента; структура цикла шлифования определяется формой и взаимным положением рабочих торцовых поверхностей ШК; текущая скорость съема припуска является функцией относительного сближения ШК и заготовки; силы, действующие со стороны оппозитных ШК в направлении нормали к обработанной поверхности, взаимно уравновешиваются; переменность скорости резания; различная фактическая кинематика процесса.

В рамках исследований процесса формообразования рассматриваются объекты пространства технологического взаимодействия – заготовка и инструмент. Влияние сопряженных с ними объектов – приспособлений и станка отражается в виде связей – геометрических, силовых, упругих, тепловых и др.

На рис. 1 представлена структурная модель процесса формообразования заготовок при ДТШО, лежащая в основе его формализованного описания и математического моделирования.





Рис. 1. Структурная модель процесса формообразования заготовки

Основные положения принятого методологического подхода: 1) процесс технологического взаимодействия инструментов и потока заготовок принимается континуальным (непрерывным); 2) процесс формообразования рассматривается с учетом взаимовлияния трансформаций поверхностей заготовок и инструментов; 3) формообразование рассматривается как динамический процесс (во времени) с учетом фазовых параметров цикла съема припуска и цикла шлифования партии заготовок; 4) обрабатываемая поверхность представляет собой геометрическое место мгновенных поверхностей шлифования с учетом их интерференции; 5) рассматривается реальное формообразование с учетом действия системных факторов, обуславливающих фактические геометрию и относительные движения заготовок и инструментов.

Задача формообразования решается в следующей постановке: определение текущей обрабатываемой поверхности и ее погрешностей в произвольный момент процесса съема припуска при переменных функциях позиционирования и инструмента, имеющих в качестве аргументов параметры, определяемые как номинальной схемой формообразования, так и действием различных факторов.

Для возможности выявления общих закономерностей процесса и особенностей его конкретных проявлений при различных вариантах реализации проведена систематизация способов и процессов ДТШО на основе классификационных и идентификационных признаков, связанных с процессом формообразования.

Идентификация варианта реализации ДТШО, необходимая для установления расчетной схемы реального формообразования и структуры формообразующей системы, выражена посредством двух векторов: вектора схемно-конструктивной идентификации  $IK_s$  и вектора факторной идентификации  $IK_f$

$$IK_s \{(S_1, M_1), \dots (S_i, M_i), \dots (S_m, M_m)\}, \quad IK_f \{(F_1, N_1), \dots (F_i, N_i), \dots (F_m, N_m)\},$$

где  $(S_i, M_i)$  и  $(F_i, N_i)$  – двузначный числовой код  $i$ -го схемно-конструктивного и факторного идентификационного признака, соответственно.

Процедура построения функции реального формообразования (ФРФ) в наиболее общем виде включает в себя идентификацию способа ДТШО, формирование массива и определение последовательности компонентов цепи формообразования, определение связей параметров и законов изменения аргументов, построение ФРФ.

Обобщенные ФРФ для цепей формообразования заготовка – ШК<sub>1</sub> (рис. 2) и заготовка – ШК<sub>2</sub> при круговой траектории (для прямолинейной построены аналогично)

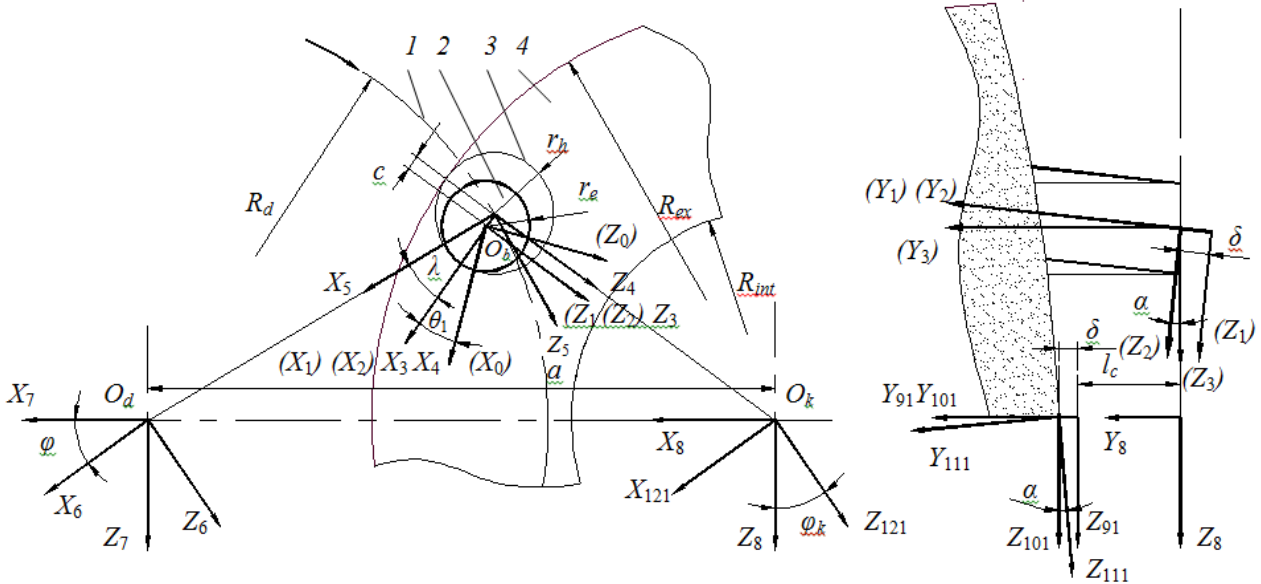


Рис. 2. Обобщенная формообразующая система при круговой траектории (1- траектория подачи, 2 – заготовка, 3 – базовая поверхность приспособления, 4 – ШК<sub>1</sub>)

$$\begin{cases} \mathbf{r}_{01} = A^5(\theta_1)A^2(\delta_p)A^4(\alpha_p)A^6(\gamma_p)A^1(-c_0)A^5(\lambda)A^1(R_d)A^5(\varphi)A^1(-a)A^2(l_{c1}) \cdot \\ \quad \cdot A^2(\delta_1)A^4(\alpha_1)A^6(\gamma_1)A^5(-\varphi_{v1})\mathbf{r}_{t1}, \\ \mathbf{r}_{02} = A^5(\theta_1)A^2(\delta_p)A^4(\alpha_p)A^6(\gamma_p)A^1(-c_0)A^5(\lambda)A^1(R_d)A^5(\varphi)A^1(-a)A^2(-l_{c2}) \cdot \\ \quad \cdot A^2(-\delta_2)A^4(-\alpha_2)A^6(-\gamma_2)A^5(-\varphi_{v2})\mathbf{r}_{t2}, \end{cases} \quad (1)$$

где радиус-векторы точек рабочих торцовых поверхностей ШК

$$\mathbf{r}_{t1} = (R_w \cos \varphi_w, Y_{t1}, R_w \sin \varphi_w, 1)^T, \quad \mathbf{r}_{t2} = (R_w \cos \varphi_w, -Y_{t2}, R_w \sin \varphi_w, 1)^T, \\ \text{при } R_{int} \leq R_w \leq R_{ext}, \quad 0 \leq \varphi_w \leq 2\pi,$$

здесь  $\mathbf{r}_{01}, \mathbf{r}_{02}$  – векторы точек обрабатываемых поверхностей,  $R_w$  и  $\varphi_w$  – полярный радиус и полярный угол точки на рабочей поверхности ШК;  $R_{int}$  и  $R_{ext}$  – внутренний и наружный радиусы ШК; T – знак транспонирования; в обозначении матриц преобразования A верхний индекс – код движения или смещения, аргумент в скобках – обобщенный идентификатор формообразования.

Уравнения (1) являются базовыми для моделирования процесса прямого целевого формообразования и расчета погрешностей обработки. Дополнительно на аргументы ФРФ накладывается ряд функциональных связей и параметрических ограничений, которые определяются из сопряженных моделей формирования и трансформации технологического пространства, профилирования абразивного инструмента и субмоделях базирования, кинематики, динамических смещений заготовки и др. (рассмотрены в главах 3, 4, 6).

В данной работе предлагается поточную ДТШО, исходя из ее особенностей, отраженных в структурной модели, концептуально рассматривать как непрерывный процесс формообразующих воздействий: инструментов на заготовки, с одной стороны, и потока заготовок на инструменты, с другой, происходящий в пространстве технологического взаимодействия (рис. 3).

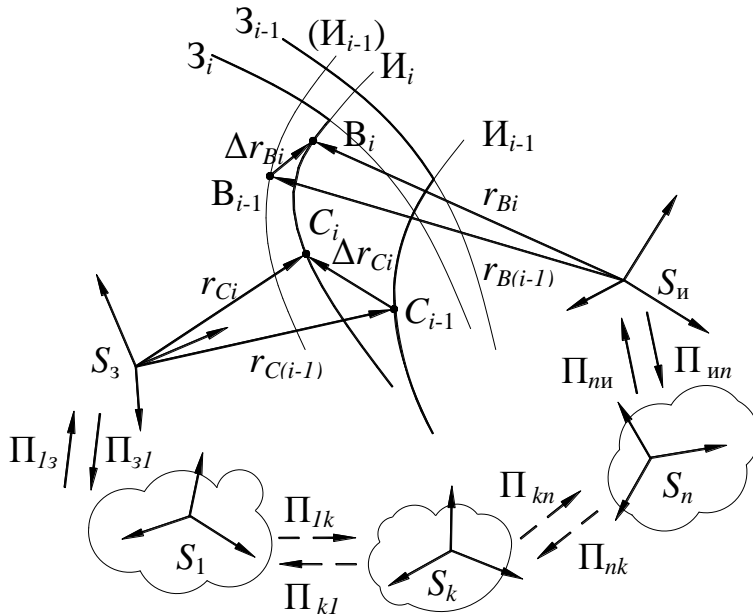


Рис. 3. Обобщенная схема континуального взаимного формообразования заготовки и инструмента

На схеме обозначено:  $S_3, S_i$  – системы координат (СК) заготовки и инструмента;  $S_1 - S_n$  – СК, связанные с образами соответствующих звеньев цепей формообразования технологической системы;  $I_i$  и  $I_{i-1}$  – фрагмент поверхности инструмента в положениях  $i$  и  $(i-1)$  в СК заготовки;  $(I_{i-1})$  – фрагмент поверхности инструмента в положении  $(i-1)$  в собственной СК;  $Z_i$  и  $Z_{i-1}$  – фрагмент поверхности заготовки в положениях  $i$  и  $(i-1)$ ;  $\Pi_{kn}, \Pi_{nk}$  – смежные преобразования координат в прямой и обратной цепях формообразования, соответственно.

Результат взаимодействия инструмента и заготовки за малое время  $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$  (за  $\Delta\tau$  удобно принять время одного оборота ШК) в точках  $C$  заготовки и  $B$  инструмента с позиций формообразования выражается в изменении радиус-вектора  $t$   $C$  заготовки в СК  $S_3$  и изменении радиус-вектора  $t$   $B$  инструмента в СК  $S_i$ .

Формально процесс обратного формообразования в  $t$   $B$ , с применением инверсии, описывается уравнением  $r_{uBi} = A_{uz}(r_{zBi-1} + \Delta r_{Bi})$ , где  $\Delta r_{Bi}$  – условное приращение эквивалентного формообразующего (для обратной задачи) профиля заготовки в  $t$   $B$ , обусловленное сопровождающим технологическое взаимодействие износом инструмента за время  $\Delta\tau$ ;  $A_{uz}$  – матрица преобразования координат в обратной цепи.

При поточной обработке заготовок, поперечные размеры которых много меньше диаметра ШК, используется допущение, значительно упрощающее решение: рассматривается поток заготовок единичного диаметра.

Развернутые выражения для функции обратного формообразования получены с применением инверсии процесса из уравнений (1) с учетом допущений и свойств обратной матрицы произведения матриц преобразования координат, например, для круговой подачи заготовок

$$\begin{cases} r_{u1}(\tau) = A^5(\varphi_{v1})A^6(-\gamma_1)A^4(-\alpha_1)A^2(-\delta_1)A^2(-l_{c1})A^1(a)A^5(-\varphi)A^1(-R_d)r_{z01}(\tau), \\ r_{u2}(\tau) = A^5(\varphi_{v2})A^6(\gamma_2)A^4(\alpha_2)A^2(\delta_2)A^2(l_{c2})A^1(a)A^5(-\varphi)A^1(-R_d)r_{z02}(\tau), \end{cases} \quad (2)$$

где радиус-векторы формообразующих точек торцов 1 и 2 заготовки в собственной системе координат

$$r_{z01(2)}(\tau) = (0, Y_{01(2)}(\tau), 0, 1)^T;$$

здесь  $Y_{01(2)}(\tau) = Y_{01(2)}(\tau - \Delta\tau) + \Delta Y_{01(2)}(q_w, \tau)$ ; приращение ординаты  $\Delta Y_{01(2)}(q_w, \tau)$  определяется текущим значением функции темпа линейной трансформации профиля  $q_w$ .

**Третья глава** посвящена вопросам формирования динамического технологического пространства (ТП) – изменяющегося во времени деформированного под дей-

ствием переменных сил пространства, ограниченного участками рабочих поверхностей торцов ШК, вдоль траектории движения торцов обрабатываемых заготовок.

Понятие ТП обладает большей степенью конкретизации, чем общепринятое в технологии машиностроения понятие рабочего пространства станка, является его частью и предопределяет реальное технологическое взаимодействие ШК и заготовок.

Формирование ТП моделируется совместным решением уравнений вида  $F_j(x_i, y_i, z_i) = 0$ , описывающих следующие характеристики процесса:  $j = 1$  - исходные торцовые поверхности ШК;  $j = 2$  - исходную форму зоны шлифования;  $j = 3$  - сьем припуска;  $j = 4$  - силы шлифования;  $j = 5$  - упругие смещения ШК.

Для возможности описания процесса обработки заготовок введен ряд новых понятий, отражающих особенности ДТШО: номинальная, начальная, реальная форма ТП; основная геометрическая характеристика ТП - кривая формы ТП (КФТП) – кривая, образованная при пересечении производящей торцовой поверхности ШК и, так называемой, поверхности подачи заготовок - поверхности, образованной перемещением оси заготовки вдоль траектории движения подачи заготовок; соответственно, различаются номинальная, начальная (КФТП<sub>н</sub>) и реальная КФТП.

Предложено рассматривать ДТШО как специфическую разновидность врезного шлифования. Определены следующие характеристики цикла съема припуска: 1) эквивалентное врезное перемещение ШК  $t_H(g_i)$  – перемещение производящей поверхности ШК в направлении нормали к номинальной обрабатываемой торцовой поверхности заготовки «при шлифовании воздуха», определяемое как разность текущей нормальной ординаты КФТП<sub>н</sub>  $y_H(g_i)$  и нормальной ординаты в точке входа заготовок в зону шлифования  $y_H(g_e)$ ,  $t_H(g_i) = y_H(g_i) - y_H(g_e)$ , 2) эквивалентная врезная подача  $S_H(g_i)$  - производная  $t_H(g_i)$  по обобщенному перемещению  $g$ .

Характеристики динамического ТП при шлифовании потока заготовок определяются для круговой и прямолинейной траектории подачи (рис. 4) на основе уравнения

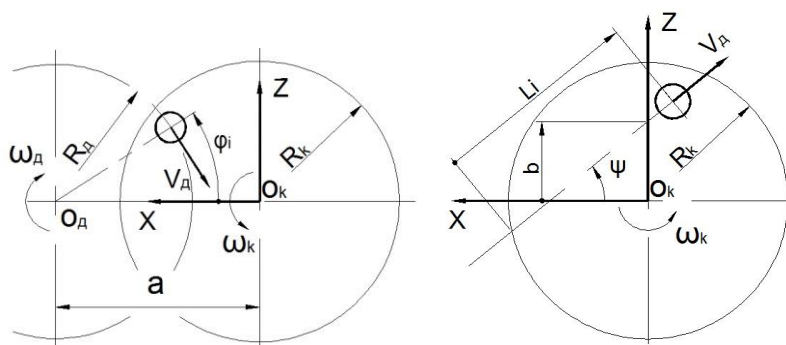


Рис. 4. Принятые системы координат и обозначения при круговой (а) и прямолинейной (б) траекториях подачи

равновесия планшайбы с ШК на двух поворотных и одной осевой опорах

$$c\bar{\Delta} = \bar{P}, \quad (3)$$

где  $\bar{P}$  - вектор обобщенной нагрузки,  $\bar{\Delta}$  - вектор обобщенных упругих смещений,  $c$  - матрица жесткости.

Угловые упругие смещения ШК при  $N$  заготовок

в зоне шлифования

$$\alpha_y, \gamma_y = f(R_d, R_{ki}, \omega_k, V_d, F, u_i, k_i, x_i, z_i, L_i, \theta_i, S_{H\theta}, c_{ПХ}, c_{Пz}) \quad (4)$$

здесь  $R_d$  - радиус окружности расположения осей заготовок,  $R_{ki}$  - текущий радиус-вектор точки траектории,  $\psi$  - угол наклона прямолинейной траектории,  $\omega_k$  - угловые скорости вращения ШК,  $V_d$  - скорость подачи заготовок,  $\theta_i$  и  $L_i$  - текущие угловая и линейная координата заготовки, отсчитываемые от начала траектории,  $F$  - площадь торца заготовки,  $u_i, k_i, x_i, z_i, S_{H\theta}$  - текущие удельная энергия шлифования, отношение

нормальной силы к тангенциальной, линейные координаты  $i$ -й заготовки, врезная подача,  $c_{пх}$ ,  $c_{пз}$  – коэффициенты поворотной жесткости,  $i \in 1, N$ .

Скорость съема припуска при круговой и прямолинейной траектории

$$S_{\theta_i} = \left(\frac{dt}{d\theta}\right)_i = S_{H\alpha} + \alpha_y R_d \text{Cos}(\varphi_B - \theta_i) + \gamma_y R_d \text{Sin}(\varphi_B - \theta_i) \quad (5)$$

$$S_{li} = \left(\frac{dt}{dl}\right)_i = S_{Hli} + \alpha_y \text{Sin}\psi + \gamma_y \text{Cos}\psi$$

Нормальные силы шлифования (при круговой и прямолинейной траектории) определяются на основе энергетических зависимостей по Глейзеру Л.А.:

$$P_{Yi} = \frac{k_i u_i V_d F S_{\theta_i}}{w_K R_d R_{Ki}}, \quad P_{Yi} = \frac{k_i u_i V_d F S_{li}}{w_K R_{Ki}}. \quad (6)$$

Осевое упругое смещение ШК -  $\delta_y = \sum_{i=1}^N P_{Yi} / c_Y$ , где  $c_Y$  - осевая жесткость.

Текущий снимаемый припуск

$$t(g_i) = t_H(g_i) - \Delta_i, \quad (7)$$

где  $\Delta_i = \gamma_y \cdot x_i + \alpha_y \cdot z_i + \delta_y$  - суммарное упругое смещение под  $i$ -й заготовкой.

Корректность предложенной методики подтверждается хорошим совпадением расчетных и экспериментальных данных. На рис. 5 приведены графики суммарных упругих смещений в различных точках ТП при вариациях параметров настройки.

Если при поточной обработке процесс съема припуска можно рассматривать как квазистатический, поскольку ТП формируется под действием суммарного силового воздействия со стороны всех одновременно обрабатываемых деталей, то при обработке одиночной заготовки имеет место существенная переменность как положения, так и величины силового воздействия на ШК.

Характеристики ТП определяются в результате решения дифференциального уравнения съема припуска, полученного из (7) с учетом (6) при  $\Delta = P_Y / c_\Sigma$

$$\frac{dt}{d\theta} + m(\theta)t(\theta) = m(\theta)t_H(\theta), \quad (8)$$

где

$$m(\theta) = \frac{w_K R_d}{ku V_d F} R_{ki} c_\Sigma, \quad \frac{1}{c_\Sigma} = \frac{Z^2}{c_{nX}} + \frac{X^2}{c_{nZ}} + \frac{R_{ki}^2}{c_{nC}} + \frac{1}{c_y} + \frac{1}{c_C}$$

- приведенная суммарная податливость упругой системы под заготовкой;

$c_\Sigma$ ,  $c_{nC}$ ,  $c_C$ , - приведенные жесткости: суммарная - упругой системы под заготовкой, поворотная и осевая - стыка ШК-планшайба, соответственно.

Уравнение (8) является линейным дифференциальным уравнением с общим решением в виде

$$t(\theta) = [t(\xi) + \int_{\xi}^{\theta} m(\theta)t_H(\theta)e^{\phi(\theta)} d\theta] e^{-\phi(\theta)},$$

здесь  $t(\xi)$ ,  $\xi$  – координаты интегральной кривой,  $\phi(\theta) = \int_{\xi}^{\theta} m(\theta) d\theta$ .

Выражения для текущего съема припуска  $t(\theta)$  и скорости съема припуска  $S_\theta$  получены при аппроксимации КФТП<sub>Н</sub> многочленом второй степени и разделении ТП на конечные элементы, в пределах которых можно принять  $m(\theta) = \text{const}$ : на участке активного съема при  $0 \leq \theta \leq \theta_{mi}$

$$t(\theta) = t(\xi_i)e^{-\phi(\theta)} - \frac{a_3}{m}[1 - e^{-\phi(\theta)}] + a_3[\theta - \xi_i e^{-\phi(\theta)}] + a_2[\theta^2 - \xi_i^2 e^{-\phi(\theta)}], \quad (9)$$

$$S_\theta = a_3 + 2a_2\theta + m\left[-\frac{a_3}{m} + \xi_i a_3 + \xi_i^2 a_2 - t(\xi_i)\right]e^{-\phi(\theta)};$$

на участке выхаживания (снятия натяга) при  $\theta > \theta_{mn}$

$$t(\theta) = t_{Ha}(\xi_i) - h_i e^{-\phi(\theta)} = t_{Ha}(\xi_i) - h_i e^{-m(\theta - \xi_i)}, \quad S_\theta = mh_i e^{-m(\theta - \xi_i)}, \quad (10)$$

где  $\theta_{mn}$  – координата точки окончания съема припуска,  $a_1, a_2$  – коэффициенты аппроксимирующего многочлена,  $a_3 = a_1 - 2a_2/m$ .

Выражения (9) и (10) позволяют определить положение точки окончания съема припуска и ее смещение вдоль траектории движения заготовки относительно точки экстремума функции  $t_{Ha}$  (рис. 6).

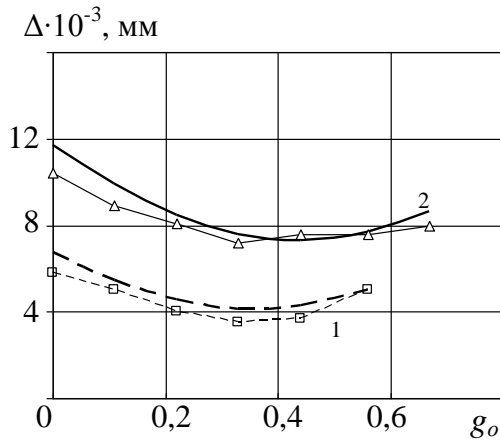


Рис. 5. Суммарные упругие смещения ТП при вариациях параметров настройки (кривые 1, 2) (линии с маркерами – эксперимент)

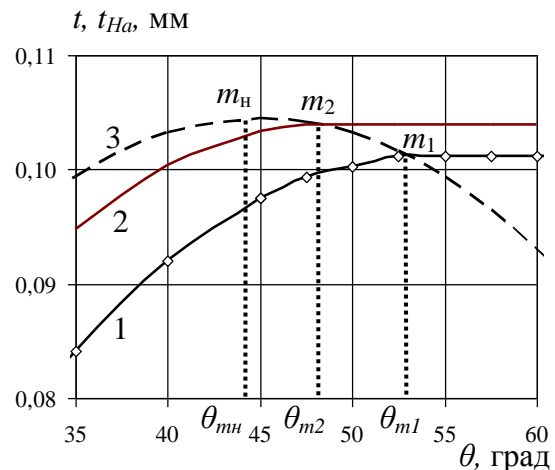


Рис. 6. Зависимость текущего съема  $t$  припуска от угловой координаты  $\theta$  заготовки в окрестности зоны выхаживания при заданном  $t_{Ha}$  (3) и вариациях приведенной жесткости  $c_{\Sigma 1} < c_{\Sigma 2}$

Установлено, что характер съема припуска и реальная протяженность зоны шлифования зависит от ряда технологических факторов, таких как скорость подачи, форма и положение ШК, приведенная жесткость упругой системы станка, что необходимо учитывать при анализе процесса формообразования и управлении ДТШО.

При несимметричных заготовках, возникает необходимость в дифференцированном подходе к выбору технологических воздействий на каждый обрабатываемый торец. Из условия  $P_{v1} = P_{v2}$  - системного условия взаимной связи технологических воздействий на два торца 1 и 2 свободной заготовки, определяющего самоустановку заготовки в осевом направлении, получены выражения для текущего съема припуска

$$t_1(g_i) = t(g_i)(1 + k'_d), \quad t_2(g_i) = t(g_i)(1 - k'_d).$$

и скорости съема припуска с каждого торца с учетом приведенного коэффициента

$$\text{асимметрии условий обработки } k'_d = f\left(\frac{k_2}{k_1} \cdot \frac{u_2}{u_1} \cdot \frac{\omega_{K1}}{\omega_{K2}} \cdot \frac{F_2}{F_1}\right) \quad (-1 < k'_d < 1).$$

Результаты моделирования асимметричной обработки согласуются с полученными ранее на основе эмпирических зависимостей отдельными результатами и подтверждают используемые при обработке колец радиально-упорных подшипников производственные рекомендации по выбору частот вращения и характеристик ШК в зависимости от соотношения площадей противоположных торцов.

Предлагаемое (пат. № 121465 РФ) разделение ТП на две зоны - зону относительно высоких скоростей съема припуска и зону относительно низких скоростей съема припуска, осуществленное с применением двухзонных ШК с гетерогенными свойствами, позволяет более обоснованно и точно назначать характеристики абразивных материалов на этих участках с целью улучшения выходных характеристик качества обработанных поверхностей. Рассмотрены методические аспекты решения конструкторской задачи определения геометрических параметров модифицированного двухзонного ШК, исходя из требуемых параметров съема припуска и заданной формы рабочих поверхностей ШК, показана возможность повышения производительности обработки при совмещении черного и чистового шлифования в 1,3 – 2,4 раза.

Третью главу завершает описание моделирования характеристик ТП.

Показана необходимость учета динамических смещений ШК под действием переменных циклических нагрузок (рис. 7). Данное положение, полученное из обобщенной модели и подтвержденное экспериментально, совпадает с эмпирическими результатами Шахновского С.С. при шлифовании колец подшипников.

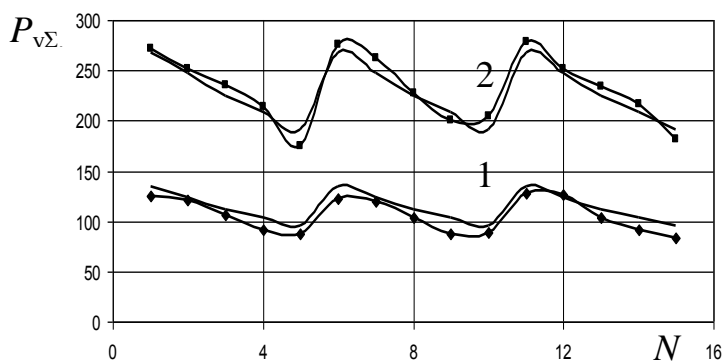


Рис. 7. Изменение  $P_{v\Sigma}$  при шлифовании потока заготовок с припуском 0,06 мм (1) и 0,12 мм (2) (с мар-

Анализ влияния приведенных характеристик жесткости упругой системы станка на характеристики ТП показал, что колебания ШК из-за непостоянства сил шлифования и точек их приложения: 1) в значительной степени зависят от приведенной к ШК поворотной и осевой жесткости станка (конструктивный фактор); 2) при равной жесткости – от начальных геометрических параметров формы и положения ТП (рис. 8).

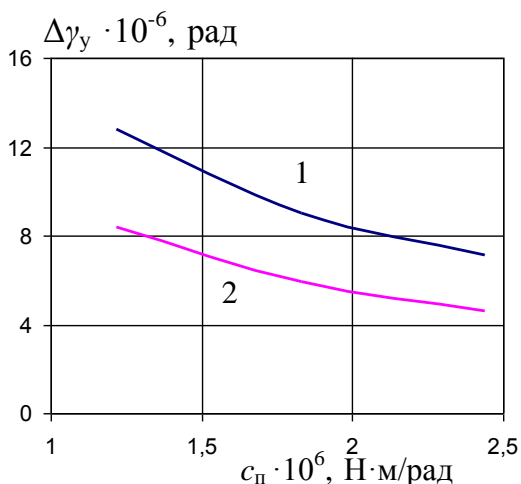


Рис. 8. Влияние приведенной жесткости  $c_n$  на амплитуду колебаний угловых упругих смещений ШК  $\Delta\gamma_y$  при разных начальных состояниях ТП: 1 – ШК – параболоид вращения; 2 – ШК – плоскость

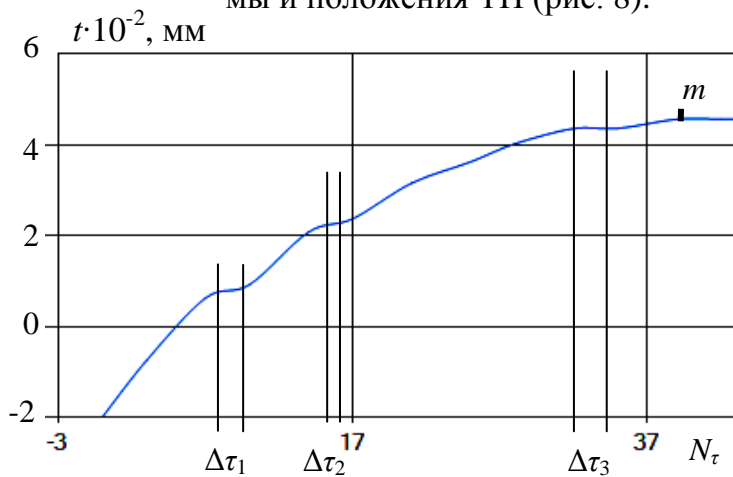


Рис. 9. Эффект отсутствия съема припуска на локальных участках ТП из-за разрыва контакта заготовки с ШК

Установлено, что динамические смещения ШК при определенном сочетании характеристик жесткости, параметров наладки станка, начального положения ШК и их формы могут вызвать нежелательный разрыв контакта поверхностей ШК и заготовки на локальных участках траектории подачи (рис. 9). Исключение или сведение к ми-

нимому отрицательных последствий разрыва контакта заготовки с ШК является одним из критериальных условий качества формообразования.

На основе вышеизложенного установлены принципы управления процессом формообразования при ДТШО: 1) обеспечение рациональной формы технологического пространства; 2) обеспечение условий постоянства контакта заготовки и ШК.

**В четвертой главе** рассмотрены методические аспекты построения алгоритмических моделей прямого целевого формообразования на основе ФРФ (1). Поставлены и решены следующие задачи: 1) определение векторов положения  $r_{01}(\rho_{1J}, \Phi_I)$  и  $r_{02}(\rho_{2J}, \Phi_I)$  массива узловых точек двух обрабатываемых торцов каждой  $i$ -й (из  $N_3$  одновременно обрабатываемых) заготовки для каждого  $j$ -го положения потока заготовок с учетом анализа условия фактического съема припуска в данной точке поверхности при вариациях: а) функций инструмента; б) цепей формообразования; в) факторных идентификаторов; 2) определение лимитирующих погрешностей торцовых поверхностей и их изменения в процессе съема припуска; 3) визуализация виртуально обрабатываемых поверхностей при заданном значении фазового параметра.

Координаты отдельной точки одного из обрабатываемых торцов заготовки в произвольный момент времени являются элементами четырехмерного массива:

$$r_{01}(\rho_{1J}, \Phi_I) = (x_{1jiI} \quad y_{1jiI} \quad z_{1jiI} \quad 1)^T, \quad r_{02}(\rho_{2J}, \Phi_I) = (x_{2jiI} \quad y_{2jiI} \quad z_{2jiI} \quad 1)^T, \quad (11)$$

здесь  $\Phi_I$  и  $\rho_{1J}$  ( $\rho_{2J}$ ) - полярный угол и полярный радиус точки  $(I, J)$  на обрабатываемой поверхности торца 1 (2) заготовки;  $r_{e1}$  ( $r_{e2}$ ) и  $r_{int1}$  ( $r_{int2}$ ) - наружный и внутренний радиусы обрабатываемого торца 1 (2) заготовки.

Основные методические особенности построения модели.

1. При моделировании обрабатываемая поверхность представлена в виде полярной сетчатой структуры.

2. На основе векторов схемно-конструктивной  $IK_s$  и факторной  $IK_f$  идентификации производится автоматизированная генерация формообразующего кода и соответствующей структуры функции позиционирования для данного варианта реализации процесса обработки в интерактивном режиме.

3. Для возможности математического описания и моделирования процесса обработки все переменные параметры (число переменных параметров  $n$ ) выражаются через один фазовый параметр - время  $\tau$  или  $g_\tau$  (текущее угловое или линейное перемещение оси заготовки вдоль траектории подачи), наложением на них  $(n-1)$  линейных или нелинейных функциональных связей вида  $q_n = f(\tau)$  или  $q_n = f(g_\tau)$ . Параметры и их связи, как правило, вычисляются в отдельных функциональных модулях и submodule. Например, переменные угловые упругие смещения ШК  $\delta_{1(2)y}$ ,  $\alpha_{1(2)y}$ ,  $\gamma_{1(2)y}$  - в модели формирования ТП.

4. Для определения текущих активных формообразующих точек поверхности каждого инструмента устанавливается текущее парное соответствие независимых координат точек обрабатываемой поверхности заготовки  $x_{01(2)}$ ,  $z_{01(2)}$  и взаимодействующих с ними активных точек поверхности ШК  $x_{t1(2)}$ ,  $z_{t1(2)}$ :

$$r_t = [x_t(x_0, z_0) \quad y_t(x_t, z_t) \quad z_t(x_0, z_0) \quad 1]^T.$$

5. Является ли текущая расчетная точка поверхности инструмента в системе координат заготовки искомой точкой обрабатываемой поверхности заготовки в рассматриваемой фазе  $(i, j)$  процесса, зависит от того, принадлежит ли данная точка мгновенной поверхности шлифования. Под мгновенной поверхностью шлифования (МПШ) понимается геометрическое место массива точек обрабатываемой поверхно-



сти, в которых в данный момент времени происходит фактический съем припуска (рис. 10). Условие принадлежности точки МПШ

$$Y_{1(2)ij} \leq Y_{1(2)i(j-1)}. \quad (12)$$

Рассматривая условие (12) последовательно от начального момента времени входа заготовки в зону шлифования ( $j = 0, i = 0$ ) до текущего ( $i, j$ ), можно получить картину изменения МПШ в процессе обработки.

6. Массивы векторов точек обрабатываемых поверхностей при произвольном значении фазового параметра  $g_\tau$

$$r_{01(2)}(g_\tau) = [x_{01(2)}(g_\tau) \ y_{01(2)}(g_\tau) \ z_{01(2)}(g_\tau) \ 1]^T.$$

Обработанная поверхность окончательно формируется при таком значении  $\tau$  (или  $g_\tau$ ), при котором условие (12) перестает выполняться для всех точек поверхности.

7. Методика расчетной оценки погрешностей обрабатываемых торцовых поверхностей соответствует принятым основным методам их измерения в производственных условиях: торцовое биение, измеряемое в окружном направлении на внешнем радиусе, погрешность формы, измеряемая в радиальном направлении, непостоянство осевого размера. Погрешности определяются через массив векторов узловых точек при сетчатом представлении поверхности. Следует отметить, что точность виртуальных измерений значительно выше реальных; так, производственные измерения погрешности формы – выпуклости торца, как правило, выполняются в двух взаимно перпендикулярных сечениях, при моделировании число сечений принималось 16-32.

Методом декомпозиции обобщенной ФРФ рассмотрены особенности и даны практические рекомендации по построению ФРФ и определению ее параметров для наиболее распространенных способов ДТШО: 1) обработка потока свободных цилиндрических роликов подшипников качения в базировочных втулках диска-сепаратора; 2) обработка потока колец конических подшипников качения; 3) обработка дисковых заготовок пружин сцепления; 4) обработка крестовин кардана в качающемся рычаге; 5) обработка потока цилиндрических роликов подшипников качения с применением устройства для их принудительного вращения.

Разработанная модель позволяет проанализировать влияние геометрических, кинематических и динамических системных факторов на процесс формообразования и точность обработки.

Для оценки влияния кинематики процесса на генерацию обрабатываемых поверхностей проведена систематизация и предложено формализованное описание характеристик вращения (ХВ) заготовок – зависимостей вида  $\omega_1=f(g_o)$  или  $\omega_1=f(\tau)$  для всех известных способов ДТШО. Показано, что все ХВ можно свести к шести модельным видам.

В результате исследований влияния на процесс формообразования и погрешности обработанных поверхностей ХВ заготовок, установлено, что основным управляющим параметром является кинематическое отношение  $k_w=\omega_1/V_d$  (рис. 11 и 12), от которого зависят как абсолютные значения погрешностей обработанных поверхностей, так и их баланс.

Доказано, что для каждого варианта реализации процесса ДТШО и соответствующего ему варианта формообразующей системы существует область рациональных характеристик вращения заготовок, обеспечивающих снижение

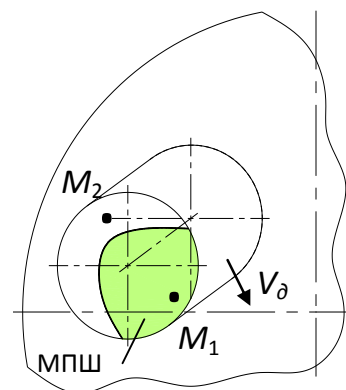


Рис. 10. Мгновенная поверхность шлифования:  $M_1 \in \text{МПШ}$ ,  $M_2 \notin \text{МПШ}$

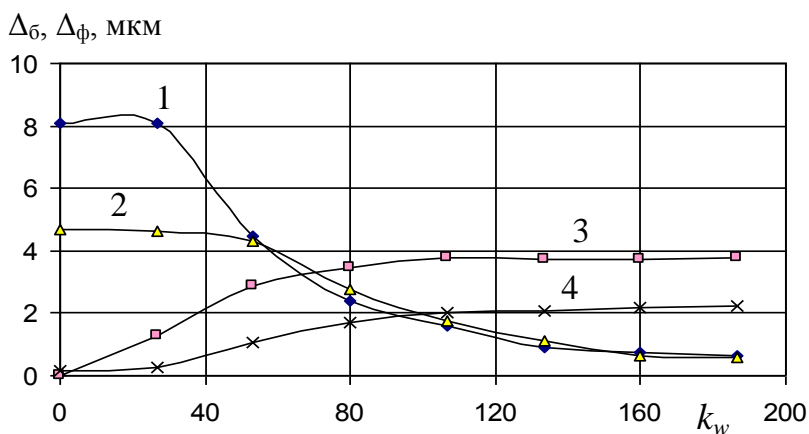


Рис. 11. Влияние  $k_w$  на  $\Delta_\delta$  (1, 2) и  $\Delta_\phi$  (3, 4) при разных вариантах формы поверхности ШК (1, 3 – плоскость, 2, 4 – параболоид вращения)

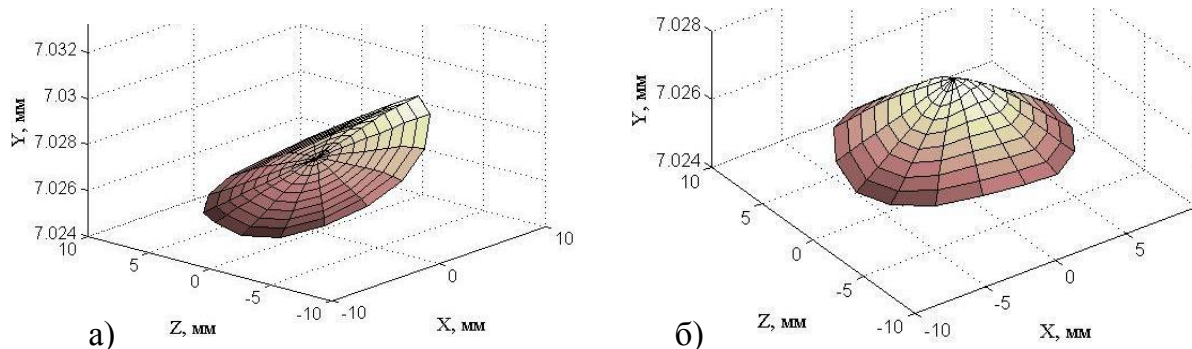


Рис. 12. Топографические портреты обработанных торцов при  $k_w=53,3$  (а) и  $k_w=159,9$  рад/м (б)

лимитирующих погрешностей обработанных поверхностей, которую необходимо определять во взаимосвязи с другими параметрами ФРФ и функции инструмента.

В целях реализации рациональных кинематических характеристик: 1) предложены новые схемы принудительного вращения заготовок (пат. РФ № 2463150 и № 2455142); 2) проведены специальные эксперименты по исследованию условий обеспечения оптимальных ХВ при шлифовании цилиндрических заготовок со свободой их поворота вокруг собственной оси (глава 5).

Известно, что при поточной ДТШО с прямолинейной траекторией подачи заготовок и разнонаправленным вращением ШК одним из существенных системных динамических факторов является угловой перекося заготовки под действием момента тангенциальных сил. Однако, в известных работах предложенные зависимости не учитывают переменность смещений заготовки в процессе обработки, поэтому не могут быть использованы при моделировании формообразования.

В связи с этим в данной работе рассмотрен механизм динамического перекося заготовки в произвольной точке ее обобщенной траектории с учетом его переменности, предложены математические зависимости для возможности его количественной оценки и учета при моделировании формообразования.

Для заданных режимов шлифования и формы ТП, исходя из критериальных ограничений лимитирующей погрешности обработки, определена область допустимых значений фактора геометрической конфигурации – отношения диаметра торца к длине заготовки  $\{D/h\}$ , при которых возможно применение схемы обработки с разнонаправленным вращением ШК.

Ввиду неоднозначности условий базирования заготовок на основе разработанной методики проведен анализ их влияния на топографию и баланс погрешностей обработанных поверхностей.

Разработанные методики и алгоритмы модели формообразования заготовок, результаты анализа и количественной оценки влияния рассмотренных геометрических, кинематических, динамических факторов на процесс формообразования служат основой для разработки обоснованных рекомендаций по управлению ДТШО, выбора параметров настройки станка и режимов шлифования.

Установлены и научно обоснованы принципы управления процессом ДТШО, направленные на повышение его точности: 1) реализация на основе установленных взаимосвязей требуемых кинематических характеристик движения заготовок; 2) необходимость ограничения системных динамических смещений заготовок и ШК.

**В пятой главе** приводится описание методик и результаты экспериментальных исследований факторов, определяющих процесс формообразования, а также разработки способа оперативной диагностики процесса и коррекции настройки двусторонних торцешлифовальных станков.

В рамках экспериментальных исследований решены следующие задачи: проведен анализ условий формирования точности, исследовано влияние режимов шлифования и параметров настройки на характеристики вращения деталей и точность, определены условия повышения точности и производительности процесса, разработан способ оперативной диагностики процесса и коррекции настройки двусторонних торцешлифовальных станков.

В качестве основного объекта исследований в лабораторно-стендовых и производственных условиях выбран один из наиболее распространенных и массовых способов ДТШО – обработка цилиндрических роликов в гнездах диска-сепаратора с круговой подачей. Данный способ представляет наибольший интерес для исследований, т. к. в нем проявляется большинство идентифицируемых формообразующих признаков – как схемно-конструктивных, так и факторных.

Разработанная в результате полного факторного эксперимента регрессионная модель точности обработки позволяет количественно оценить степень влияния основных технологических параметров – углов настройки ШК, припуска и скорости подачи на величину биения обработанных торцов. В дальнейших исследованиях раскрыты физические причины установленных зависимостей и значимостей коэффициентов регрессии - было установлено, что эти причины обусловлены характером влияния упомянутых параметров на показатели ХВ, связанные с точностью обработки.

Условием минимизации погрешности обработанных торцов роликов по параметру торцового биения является их стабильное вращение в зоне шлифования. В связи с этим были исследованы ХВ при вариациях технологических параметров ( $\gamma_n$ ,  $\alpha_n$ ,  $\Delta t$ ,  $V_d$ ). Выявлены абсолютные и относительные показатели ХВ, связывающие ее с точностью обработки (рис. 13): вид ХВ, длина участка вращения при его непрерывности –  $L_B$ , пиковое значение частоты вращения ролика после прохождения им центра зоны шлифования –  $f_n$ , суммарная протяженность участков, на которых ролик вращается со съемом припуска -  $L_B^P$ ; установлены их оптимальные значения, которые обеспечиваются выбором параметров режима шлифования и настройки станка: вид ХВ - 3,  $L_{B0}^P = 1$ ,  $L_B > L_3$ ,  $f_n = \max$ .

Такая форма кривой ХВ с требуемыми показателями является эталоном при настройке торцешлифовальных станков с целью получения наивысшей для заданных условий шлифования точности обработки по параметру торцового биения.

Показано благоприятное влияние увеличения снимаемого припуска  $\Delta t$  и скорости подачи  $V_d$  на ХВ и точность обработки, и обоснована возможность высокопроизводительной обработки роликов с величинами  $\Delta t$  и  $V_d$  из верхнего диапазона приме-

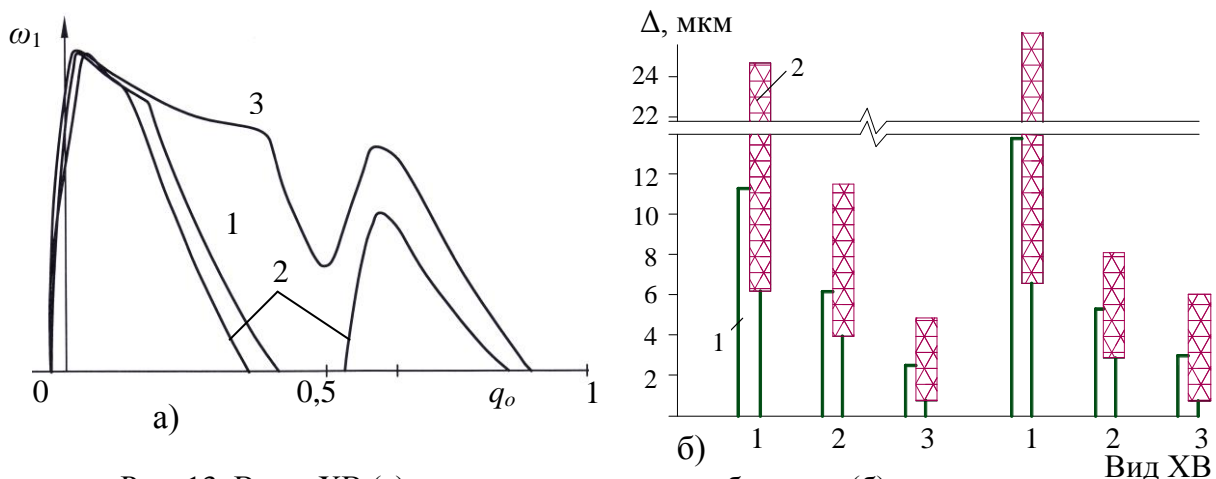


Рис. 13. Виды ХВ (а) и их связь с торцовым биением (б)

няемых в производственных условиях -  $\Delta t = 0,12-0,15$  мм и  $V_p = 7-8$  м/мин; производительность (штучная и съема припуска) увеличивается в 1,8 – 2,4 раза.

В результате серии специальных экспериментов установлены связь между точностью и шероховатостью обработанной поверхности и возможность генерации микрорельефа близкого к изотропному (рис. 14). Полученный микрорельеф характеризуется повышенной плотностью пиков, их меньшей разновысотностью, что обуславливает благоприятный режим приработки поверхности в начальный период эксплуатации. Установлено, что при обеспечении требуемых характеристик вращения роликов и точности обработки по параметру торцового биения можно ожидать минимальных значений высоты микронеровностей обработанных торцовых поверхностей для заданных характеристик ШК и условий шлифования.

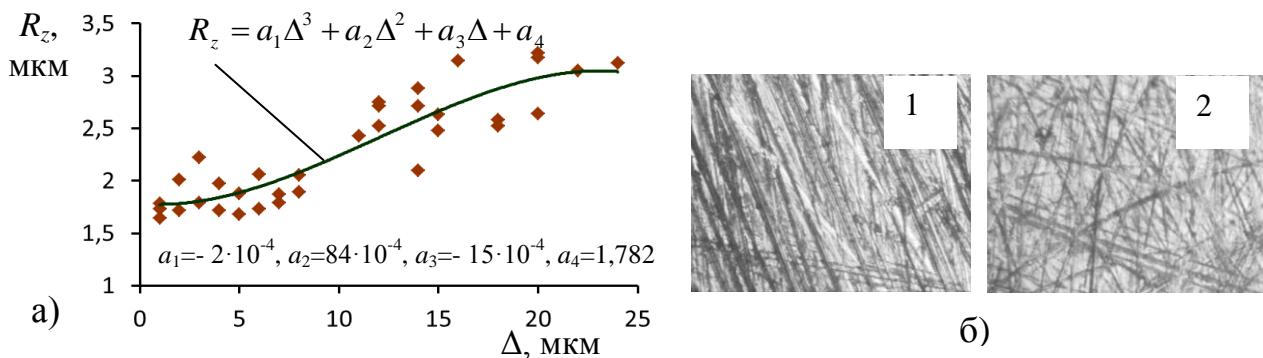


Рис. 14. Связь средней высоты микронеровностей  $R_z$  с торцовым биением  $\Delta$  (а) и следы абразивных зерен на обработанных поверхностях при ХВ первого (1) и третьего (2) видов (б)

При разработке и исследовании способа диагностики процесса ДТШО в производственных условиях были решены следующие задачи: проверка гипотезы о возбуждении высокочастотных колебаний динамической системы диска вращающимся роликом; определение информативной емкости вибрационного сигнала; сопоставление количественных показателей вибрационного сигнала с показателями ХВ и точностью обработки. На основе данного способа диагностики разработаны и защищены патентами методы оперативной коррекции управляющих параметров при производственной настройке станка (см. главу 7) и контроля состояния поверхностей ШК.

**Шестая глава** посвящена моделированию и экспериментальному исследованию трансформации поверхности ШК в результате обратного формообразования, анализу формоустойчивости ШК, а также генерации требуемых модифицированных производящих поверхностей ШК в процессе правки.

Динамику трансформации ТП наглядно иллюстрирует граф его смежных состояний при временной дискретизации  $\Delta T$  (рис. 15), где  $\{\delta_m(g)\}$  – область распределения функции линейной трансформации поверхности (ЛТП-функции) вдоль фрагмента траектории движения заготовки при переходе из состояния  $T_m$  в состояние  $T_{m+1}$ .

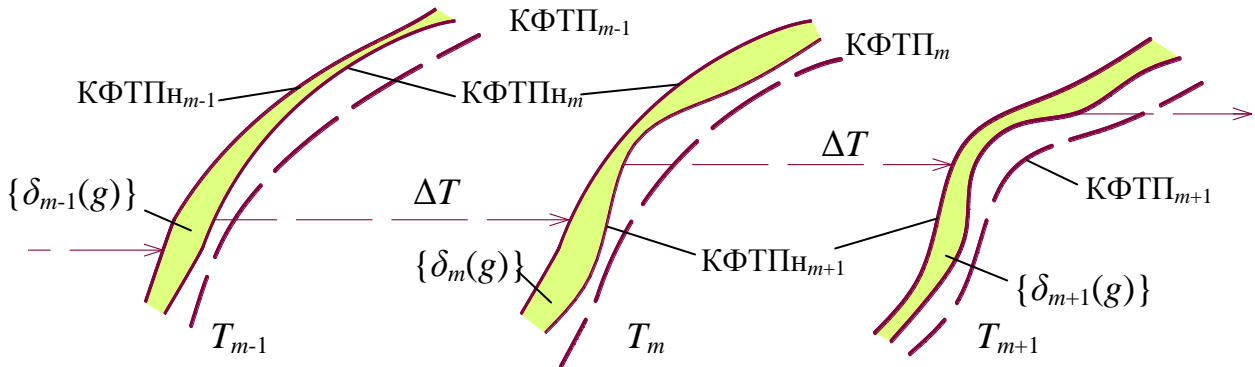


Рис. 15. Граф смежных состояний процесса трансформации ТП при дискретизации  $\Delta T$

Изменение положения произвольной точки поверхности ШК в результате удаления материала за время  $\Delta T = T - T_1$  ( $T$  – текущий момент времени;  $T_1$  – начало отсчета.)

$$\delta(R, T) = \int_{T_1}^T q_w(R, T) d\tau,$$

здесь  $q_w(R, T)$  – темп линейной трансформации профиля поверхности инструмента – скорость изменения положения точки на поверхности инструмента в заданном направлении в единицу времени, обусловленного удалением материала инструмента в процессе технологического взаимодействия с потоком заготовок (ЛТП-функция).

Выражения для  $q_w(R, T)$  получены на основе равенства работ тангенциальных сил, затрачиваемых на удаление объемов материалов заготовки и инструмента.

Текущая ордината кривой съема припуска в  $k$ -й точке траектории с учетом трансформации профиля ШК в  $m$ -й момент времени

$$t_{km}(g_k, T_m) = t_{Hk}(g_k, T_m) - \Delta_{km}[g_k, T_m, t'_{km}(g_k, T_m)] - \delta_{km}[R_k, T_m, t'_{km}(g_k, T_m)], \quad (13)$$

здесь  $g_k$  – обобщенная координата заготовки,  $t_{hk}$  – эквивалентное врезное перемещение,  $\Delta_{km}$  – текущее относительное упругое смещение.

Уравнение (13) после подстановки выражений для  $t_{hk}$ ,  $\Delta_{km}$ ,  $\delta_{km}$  представляет собой дифференциальное уравнение съема припуска с учетом действия всех основных процессов различной скорости, сопровождающих процесс обработки (формирование начальной формы ТП, упругая деформация ТП и его необратимая трансформация в результате изнашивания). Из-за сложности аналитического решения данное уравнение решается численно, при этом используется оригинальный методический прием – двойная временная дискретизация процесса обработки партии заготовок. Основанием для двойной дискретизации служит то обстоятельство, что время цикла обработки одной заготовки из потока (или цикла прямого формообразования) на  $\sim 3$  порядка меньше времени цикла изнашивания ШК (или цикла обратного формообразования), т. е. суммарного времени технологического взаимодействия потока заготовок и инструмента между правками. В этом случае функция  $\delta_{km}$  определяется по значениям  $t_{km}$ , найденным на предыдущем шаге цикла обратного формообразования, что значительно упрощает решение.

Уравнение трансформированной поверхности ШК в момент времени  $T_m$

$$\mathbf{r}(T_m) = (x, y_H - \delta_m(T_m), z, 1)^T.$$

Для представления уравнения инструмента как непрерывной функции, необходимой для дальнейших расчетов характеристик ТП и обрабатываемой поверхности, предусмотрена операция интерполирования функции  $r_w(R, T)$ , вычисленной на заданном интервале  $R$  в момент времени  $T$ . На основании проведенного анализа вариантов интерполирования по совокупности признаков и условий для решения поставленной задачи принята кусочно-сплайновая интерполяция неоднородными  $b$ -сплайнами третьего порядка.

Предложена методика оценки и прогнозирования трансформации ТП на основе двух критериальных показателей нормированной ТЛТП-функции - ее вида и минимального значения  $q_{womin}$ .

Встречающиеся зависимости  $q_{wo}(R)$  (рис. 16) можно отнести к двум видам – монотонно убывающей (за исключением отдельных локальных точек, не меняющих общую картину) – вида 1 и монотонно возрастающей – вида 2. Очевидно, что условия для самозатачивания и поддержания исходной рациональной формы ШК возможны только при монотонно убывающей ТЛТП-функции, т. к. в противном случае меньшие скорости изнашивания на малых радиусах приведут к быстрому затуплению и засаливанию ШК в центральной части при невозможности влиять на этот неблагоприятный процесс периодической подналадкой ШК, осуществляемой для выдерживания осевого размера. Таким образом, варианты настройки ТП при которых реализуется ТЛТП-функция вида 2 следует исключать из рассмотрения.

Минимальное значение  $q_{womin}$  характеризует начальную неравномерность трансформации поверхности и также должно быть ограничено

$$q_{womin}(R, T=0) \geq [q_{wo}] \quad (14).$$

Проведенный анализ развития процесса трансформации ТП и его связи с реальными характеристиками съема припуска при различных исходных состояниях ТП показал, что наиболее высокой формоустойчивостью обладают ШК с параболической модификацией, обеспечивая режим рационального самозатачивания.

Типовая динамика показателей точности обработки при поточном шлифовании партии колец подшипников качения характеризуется периодом времени  $T_k$ , соответствующим критическому моменту потери стабильности процесса и выходу значений лимитирующих погрешностей за пределы допуска. Нами было выдвинуто предположение, что это связано с критическим изменением формы рабочих поверхностей ШК, и проведено специальное расчетно-экспериментальное исследование характера их трансформации. В результате были вскрыты следующие общие закономерности: 1) трансформация торцевой поверхности ШК распространяется в радиальном направлении от центра (не считая приработочного износа наружной кольцевой зоны); 2) наблюдается существенная неравномерность износа (рис. 17); наибольшему износу подвержена внутренняя область поверхности ШК  $0 < R < R_r$ ; 3) как расчетные, так и экспериментальные зависимости  $\Delta H(R)$  для всех контрольных ШК отличаются отсутствием монотонности – поверхность ШК представляет собой сглаженное чередование кольцевых впадин и выпуклостей с амплитудой второго порядка малости; 4) имеющее место при  $T > T_k$  недопустимое изменение формы ШК приводит к нарушению заданной рациональной структуры цикла шлифования; съем припуска перераспределяется и осуществляется только в начале зоны шлифования и, что особенно неприемлемо, на выходе из нее; это влечет за собой потерю точности обработки.

Вид и характер изменения расчетных зависимостей  $\Delta H(R)$  хорошо согласуются с экспериментальными данными (рис. 17), что свидетельствует о корректности разработанных расчетной методики и математической модели; заметим, что расхождения

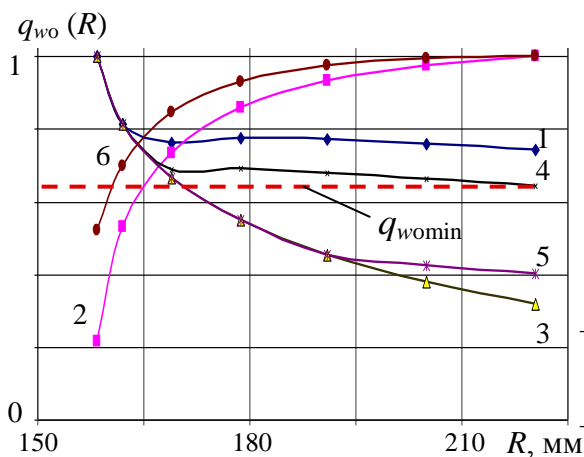


Рис. 16. Нормированная ТЛТП-функция  $q_{wo}(R)$  при вариациях ТП (1 - 6) при круговой траектории

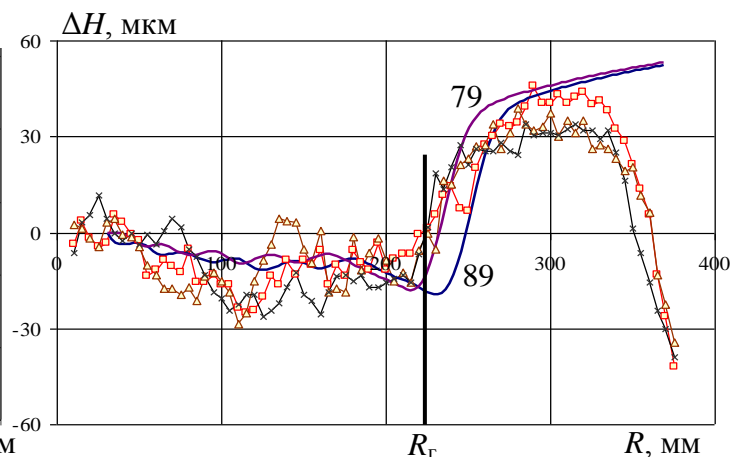


Рис. 17. Средние значения  $\Delta H$  по 8 трассам сканирования для трех испытуемых ШК (с маркерами) и расчетные кривые  $\Delta H$  для временных шагов 79 и 89

расчетных и экспериментальных кривых вблизи наружного радиуса объясняется кромочным эффектом – интенсивным износом приграничной цилиндрической поверхности ШК при периодических осевых смещениях ШК, реализуемых для выдерживания осевого размера заготовки.

Обнаружено явление циклической повторяемости процесса трансформации поверхностей ШК при отсутствии ограничения, связанного с прекращением шлифования потока заготовок при потере точности, открывающее перспективные возможности повышения производительности процесса. Для этого необходимы целенаправленные мероприятия по выравниванию скорости трансформации профиля ШК на критических этапах процесса шлифования потока заготовок.

На основании результатов исследования трансформации рабочей поверхности предложена и принята к реализации на ОАО «Волжский подшипниковый завод» в качестве одной из стратегий технологического управления процессом обоснованное увеличение твердости внутренней части рабочей торцевой поверхности ШК. Разработана и внедрена в производство инновационная конструкция двухзонного ШК (пат. РФ № 121465) с расположением границы кольцевых зон по окружности радиуса  $R_r$ .

Предложенные методика, алгоритмическая и компьютерная модель позволяют оценить ТП с точки зрения его потенциальной формоустойчивости, проанализировать влияние параметров настройки положения и формы исходных рабочих поверхностей ШК на развитие процесса их трансформации. В результате установлен и обоснован принцип управления процессом ДТШО - обеспечение формоустойчивости производящих поверхностей ШК и критериальные ограничения для его реализации, используемые при синтезе эффективных управляющих параметров.

В связи с доказанным благоприятным влиянием параболической модификации рабочих поверхностей ШК на формоустойчивость ТП и показатели точности обработанных торцов, созданы математическая модель и устройства правки, обеспечивающие формирование исходной производящей поверхности ШК в виде параболоида вращения с заданной выпуклостью профиля.

В общем случае в функцию формообразования ШК входит 6 матриц преобразования с аргументами - смещениями  $(c_x, c_y, c_z, a_x, a_y, a_z)$  системы правки относительно ШК. Вектор произвольной точки ШК является функцией восьми параметров-констант и одного переменного параметра  $\varphi$  – полярной координаты наконечника

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(c_x, c_y, c_z, a_x, a_y, a_z, r_x, r_z, \varphi). \quad (15)$$

При решении прямой задачи анализа при различных сочетаниях параметров-констант можно сформировать качественно разные торцовые поверхности ШК с расположением экстремума профильной функции  $y_1(R)$  как на границе диапазона изменения  $R$ , так и внутри него.

Задача синтеза формообразующей системы правки предполагает определение ее параметров для получения заданной поверхности ШК третьего порядка близкой к параболоиду вращения (квазипараболоида). Наряду с численными методами, предложены методики, основанные на определенных допущениях и ограничениях, связанных с конкретизацией наладочных параметров устройства правки, позволяющие получить искомые параметры в явном виде.

Пример 1. Торцовая поверхность ШК сплошная –  $0 \leq R \leq R_e$ , траектория накопника правки – дуга окружности радиуса  $r_n$  проходит через центр ШК, требуемый криволинейный профиль ШК имеет единственный экстремум в его центре, заданный перепад профиля  $\Delta_n$ , осевое смещение систем координат  $S_1$  и  $S_2$  отсутствует:

$$y'(R=0) = 0, \quad y(R=0) - y(R=R_e) = \Delta_n, \quad r_2 = (r_n \cos \varphi \quad 0 \quad r_n \sin \varphi \quad 1)^T, \quad c_y = 0 \quad (16)$$

Решая совместно (15) и (16), получаем элементарные выражения для требуемых относительных угловых смещений систем координат  $S_1$  и  $S_2$

$$\alpha_x = \arcsin\left(\frac{2\Delta_n \cdot c_z}{R_e^2}\right), \quad \alpha_z = \arcsin\left(\frac{2\Delta_n \cdot c_x}{R_e^2}\right), \quad \text{где } c_x = \sqrt{r_n^2 - c_z^2}.$$

Пример 2. В общем случае поверхность ШК кольцевая -  $R_{int} \leq R \leq R_e$ , требуемый радиальный профиль ШК имеет постоянный знак первой производной и единственный экстремум на минимальном радиусе  $R_{int}$ , заданный перепад профиля -  $\Delta_n$ :

$$y'(R=R_{int}) = 0, \quad y(R=R_{int}) - y(R=R_e) = \Delta_n.$$

Задача синтеза сводится к решению системы двух трансцендентных уравнений относительно двух параметров  $\varphi$  и  $\alpha_x$

$$\begin{cases} \sqrt{[r_x \cdot \cos \varphi \cdot \cos \alpha_z + (r_z \cdot \sin \varphi - c_z) \cdot \sin \alpha_x \cdot \sin \alpha_z - c_x]^2 + [(r_z \cdot \sin \varphi - c_z) \cdot \cos \alpha_x]^2} = R_e \\ -r_x \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha_z + (r_z \cdot \sin \varphi - c_z) \cdot \sin \alpha_x \cdot \cos \alpha_z + c_z = \Delta_n \end{cases}$$

Среди численных способов можно воспользоваться градиентными итерационными методами направленного поиска неизвестных. Приведены результаты параметрического синтеза формообразующей системы правки -  $\alpha_x(\Delta_n)$  с использованием функции итерационного подбора параметров программы Excel из пакета Microsoft Office. Данные зависимости, предварительно рассчитанные и выраженные в табличной или графической форме, служат инструктивным материалом при настройке устройства правки. Для технической реализации задачи синтеза формообразующей системы правки разработано соответствующее устройство (пат. РФ № 126980).

В главе 7 освещены вопросы реализации стратегии, методов и средств эффективного управления процессом формообразования при ДТШО.

Стратегия управления процессом формообразования при ДТШО заключается в обеспечении качества составляющих процессов, для чего необходима реализация установленных принципов управления.

Математическая модель качества взаимного формообразования в общем параметрическом виде с учетом системы критериальных условий и функциональных ограничений, соответствующих совокупности принципов управления:

$$r_0 = r_0(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad r_i = r_i(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad f_i(x_1, x_2, \dots, x_m) \leq C_j, \quad (17)$$

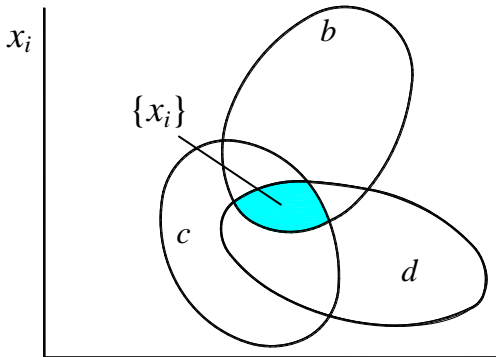
где  $r_0$  и  $r_i$  – функции прямого и обратного формообразования;

$X(x_1, \dots, x_i, \dots, x_m)$  вектор управляющих технологических параметров при  $i=1, \dots, m$ ;



$C_j$  – критериальная характеристика или ограничение,  $j=1, \dots, k$ .

Система (17) в пространстве управляющих параметров определяет области существования допустимых значений параметра  $x_i$ . Область эффективных значений параметра  $\{x_i\}$  при основных критериях  $b, c, d$  определяется как пересечение множеств (рис. 18)



$X(x_1, x_2, \dots, x_m)$  при  $x_i \notin X$

Рис. 18. Область эффективных значений  $\{x_i\}$  в параметрическом пространстве

$$\{x_i\} \in \{x_{ib}\} \cap \{x_{ic}\} \cap \{x_{id}\}. \quad (20)$$

В общем случае  $\{x_i\}$  определяется во всем диапазоне изменения вектора управляющих параметров  $X$ , определяющего полный спектр состояний технологической системы.

Предлагаемый подход к интерактивному направленному синтезу параметров управления процессом формообразования, суть которого выражается во введении параметрических, критериальных и функциональных ограничений (табл.) и определенной последовательности процедур синтеза  $C_1 \rightarrow C_4$  (рис. 19), позволяет в значительной степени снизить их число и диапазоны изменения.

Таблица

Критериальные и функциональные характеристики

| Принцип управления процессом формообразования                        | Критериальные и функциональные характеристики   |
|--|---|
| Обеспечение рациональной формы ТП                                    | - $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ (погрешности обработки);<br>- закон изменения скорости съема припуска $S$ ;<br>- координата окончания съема припуска $g_m$ ;<br>- скорость шлифования при выхаживании $V(g_m)$ |
| Реализация требуемых кинематических характеристик движения заготовок | - вид и показатели ХВ;<br>- отношение $w_3/V_d$   |
| Обеспечение формоустойчивости производящих поверхностей ШК           | - ТЛТП-функция $q_w$ ;<br>- условие работы ШК всей рабочей поверхностью   |
| Обеспечение условия постоянства контакта заготовки и ШК              | $Y_{1(2)ij} \leq Y_{1(2)i(j-1)}$ при $0 \leq g_0 \leq 1$  |
| Ограничение системных динамических смещений заготовок и ШК           | $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3; \Delta_{ym} \rightarrow 0$   |

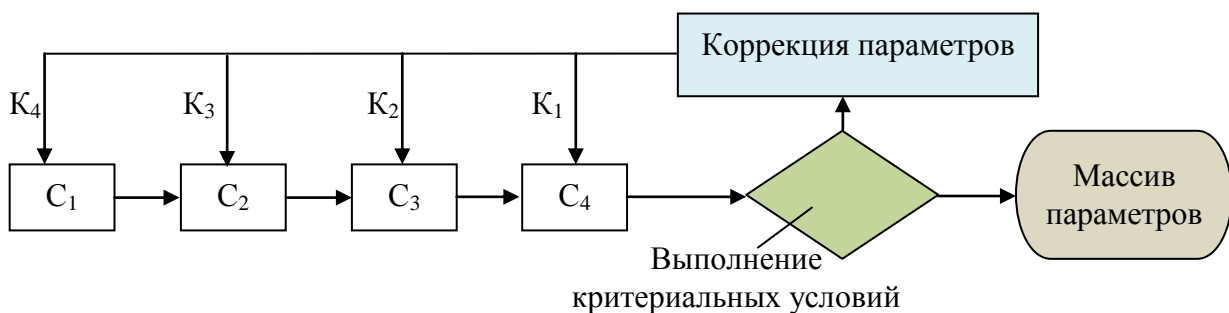


Рис. 19. Последовательность процедур синтеза конструктивных и эксплуатационных параметров

Корректировка значений параметров для выполнения критериальных условий происходит в обратной последовательности ( $K_1 \rightarrow K_4$ ). Здесь  $C_1$  – синтез конструктивных параметров станка (характеристик жесткости и геометрических размеров),  $C_2$  –

синтез конструктивных параметров приспособлений и инструмента ( $R_d, R_k, R_o, a, \Delta\varphi, b, \psi, \Delta l$ ),  $C_3$  – синтез эксплуатационных параметров геометрической настройки ТП и правки ( $\alpha_n, \gamma_n, l_{c1} + l_{c2}, L, c, \beta, \alpha_x, \alpha_y$ ),  $C_4$  – синтез эксплуатационных режимных параметров ( $V_d, \omega_k, \omega_3, \Delta t, S_B$ ).

При синтезе параметров настройки станка для шлифования деталей типа цилиндрических роликов с круговой подачей основным критерием-детерминантом управления формообразованием является обеспечение ХВ с требуемыми показателями, при которых достигается минимизация торцового биения.

Ниже дано графическое отображение рассмотренной методики синтеза эффективных параметров настройки в пространстве  $\alpha - \gamma$  при наложении актуальных критериальных и функциональных ограничений (рис. 20). Область 7 эффективных значений параметров настройки углового положения ШК  $\{\alpha, \gamma\}$  определяется (20) в результате наложения следующих ограничений: 1 и 2 - реализация требуемой ХВ третьего вида; 3 - минимально допустимый уровень  $\alpha / \gamma$ , определяющий координату окончания съема припуска  $g_m$ ; 4 - максимально допустимый уровень  $\alpha / \gamma$ , от которого зависит формоустойчивость рабочих поверхностей ШК; 5 - точность формы обработанных торцовых поверхностей; 6 - одно из условий формоустойчивости поверхностей ШК под воздействием потока заготовок – работа ШК всей торцовой поверхностью.

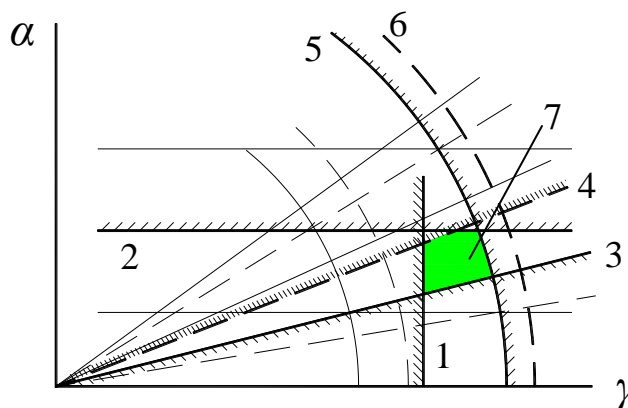


Рис. 20. Графическое отображение синтеза параметров настройки

При синтезе управляющих параметров ДТШО деталей типа колец подшипников с прямолинейной подачей за основной критерий-детерминант качества формообразования, состоятельность которого доказана в исследованиях Шахновского С.С., принята минимизация упругих смещений ШК в зоне калибрования (в т. т), реализуемая при определенном соотношении приведенной поворотной  $c_n$  и осевой  $c_{oc}$  жесткостей станка  $\Delta_{ym} = f\left(\frac{c_n}{c_{oc}}\right) = MIN \rightarrow 0$ .

Положение точки  $t$  определяется из второго по значимости функционального условия для вариантов шлифования с прямолинейной подачей – ограничения на минимальное значение ТЛТП-функции (14).

Последовательность и содержание основных этапов параметрического синтеза рассматриваемого варианта реализации ДТШО:

1. Выбор исходных значений параметров.
2. Расчет начальных значений  $\gamma_n, \alpha_n, c$ .
3. Область эффективных значений  $c_n/c_{oc}$  определяется из семейства зависимостей  $\Delta_m = f(c_n/c_{oc})$ , построенных при вариациях эксплуатационных параметров настройки, обуславливающих возможный дрейф точки  $t$  (рис. 21).

4. Определение значений приведенных жесткостей  $c_n$  и  $c_{oc}$  из условия постоянства контакта заготовки и ШК представляет собой итерационный процесс циклического построения функции съема припуска  $t = f(g_o)$  при  $c_{oc} = var$  и  $c_n/c_{oc} = const$  с проверкой выполнения условия съема припуска с  $i$ -й заготовки в  $j$ -й фазе процесса. Из полученного вектора коэффициентов жесткости  $\{c_{oc1}, c_{oc2}, \dots, c_{ocn}\}$ , рассчитанных при ва-

риациях управляющих параметров, необходимо выбрать максимальное значение  $c_{оcmax}$ .

5. При известных характеристиках жесткости можно определить составляющую угла настройки  $\alpha_n$  для компенсации средних упругих смещений в вертикальной плоскости  $\bar{\alpha}_y$  и выполнения условия параллельности образующих поверхностей ШК в вертикальной плоскости.

Этапы 6 и 7 - уточнение параметров настройки формы ТП из критериальных условий формоустойчивости ТП и рациональной структуры цикла съема припуска, ввиду их взаимосвязи проводятся в одной алгоритмической модели (графическое отображение см. на рис. 22).

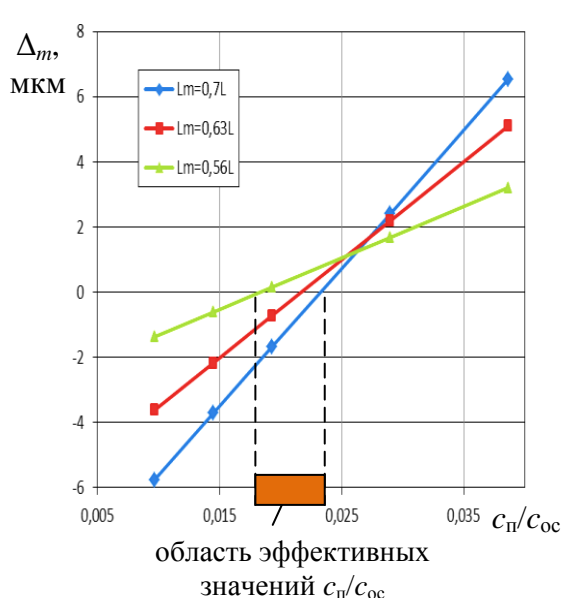


Рис. 21. Определение области эффективных значений  $c_n/c_{oc}$  при вариациях относительной координаты точки  $m$

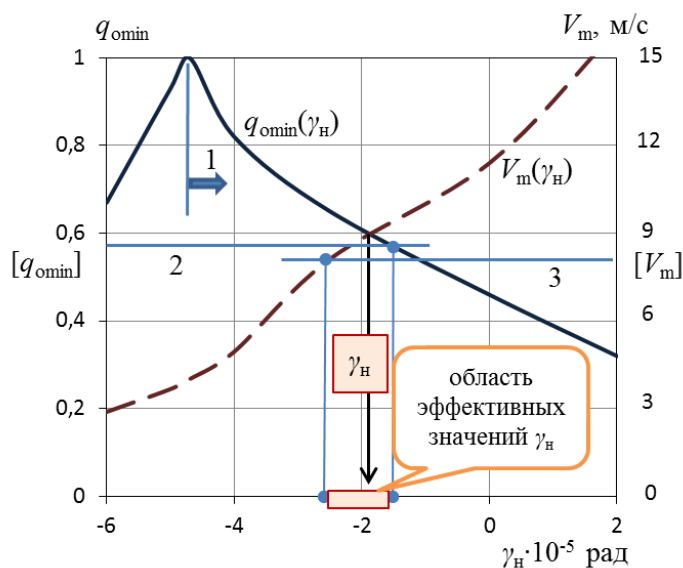


Рис. 22. Определение области эффективных значений  $\gamma_n$ , из критериальных условий формоустойчивости ШК и рационального цикла съема припуска

8. Генерация обработанных торцовых поверхностей, их визуализация, расчет погрешностей с учетом действующих системных факторов, в частности, действующих системных динамических смещений в случае разнонаправленного вращения ШК, проверка критерия

$$\Delta_{1(2)} \leq [\Delta],$$

и при необходимости - направленная коррекция найденных управляющих параметров в рекомендованной последовательности.

В результате рассмотренной процедуры синтеза определяется вектор управляющих параметров  $X\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\}$ . Так для случая шлифования колец подшипников диаметром 100 мм при  $R_{ext}=0,375$  м,  $n_k=900$  об/мин,  $b=0,03$  м,  $\psi=0$  найдены компоненты вектора  $X$ :  $x_1=c_n/c_{oc}=0,023$ ,  $x_2=c_n=365 \cdot 10^4$  н·м/рад,  $x_3=c=0,03$  мм,  $x_4=\gamma_n=-1,9 \cdot 10^{-5}$  рад,  $x_5=\alpha_n=-0,7 \cdot 10^{-5}$  рад,  $x_6=\Delta t=0,04$  мм,  $x_7=V_d=0,065$  м/с. Топографические портреты виртуально обработанных поверхностей приведены на рис. 23.

Предлагаемые в работе методологические аспекты, методики, модели разработаны на базе теории технологического формообразования, в которой используется детерминированный подход. Однако известно, что процесс шлифования и ДТШО, в частности, характеризуется совокупным действием многих случайных трудно учитываемых факторов, в связи с чем общая стратегия управления качеством формообразования реализуется через тактические мероприятия, которые можно объединить в два

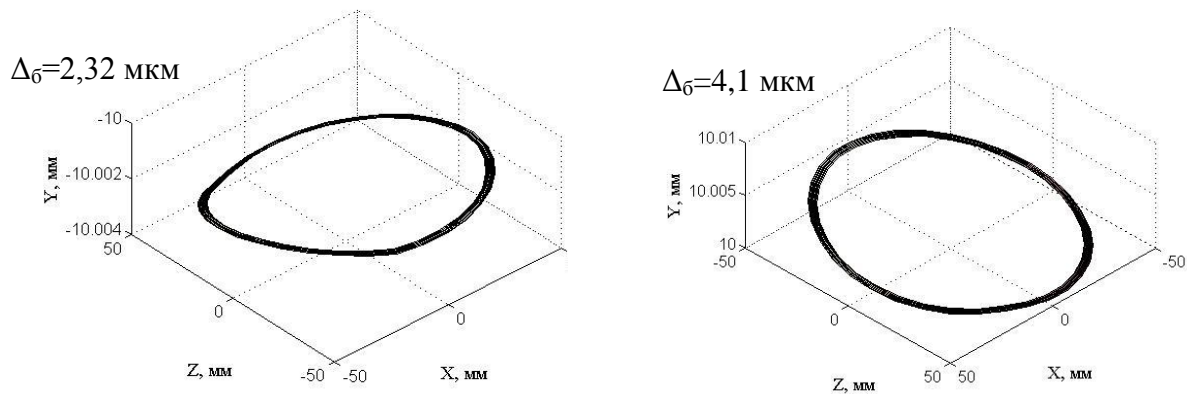


Рис. 23. Топографические портреты и погрешности обработанных торцов при синтезированных управляющих параметрах

этапа: 1) предварительный интерактивный синтез управляющих параметров с использованием среды виртуальной ДТШО; 2) оперативная направленная коррекция управляющих параметров настройки и режимов в производственных условиях.

В настоящее время о качестве настройки двустороннего торцешлифовального станка судят по измеренным погрешностям обработки. Поведение заготовки и ее взаимодействие с ШК в процессе обработки не контролируется, в связи с этим не могут быть выявлены причины низкой точности и, соответственно, предприняты конкретные направленные действия для ее повышения.

Разработанный способ виброакустической диагностики процесса ДТШО, основанный на эффекте возбуждения высокочастотных колебаний динамической системы диска-сепаратора вращающимся роликом, и доказанная связь показателей виброхарактеристики процесса (ВХП) с точностью обработки позволяют использовать ВХП для оперативной производственной настройки двусторонних торцешлифовальных станков и ее коррекции.

Информативная емкость ВХП позволяет оценить при настройке станка следующие критериальные и функциональные характеристики качества процесса формообразования: вид ХВ;  $f_{п}$ ;  $L_B^P$ ;  $g_m$ ; условие работы ШК всей торцевой поверхностью; наличие местных искажений формы ШК; скорость шлифования в точке  $g_m - V_{\kappa}(g_m)$ .

На основе проведенных исследований вышеперечисленных характеристик с точностью обработки сформулированы признаки эталонной формы ВХП: непрерывность ВХП -  $L_{VH0}=1$ ; протяженность ВХП должна соответствовать рекомендуемым значениям  $g_m$ ; рекомендуемый интервал значений относительной высоты вибросигнала  $H_{p0}=0,5-0,7$ ; симметричность уровней вибросигнала в центре зоны.

Перечисленные признаки, при которых обеспечивается наивысшая в данных условиях точность торцов, положены в основу косвенного критерия настройки станка и ее коррекции. Установленная связь показателей ХВ и ВХП с управляющими параметрами позволяют осуществлять коррекцию последних направленно (рис. 24).

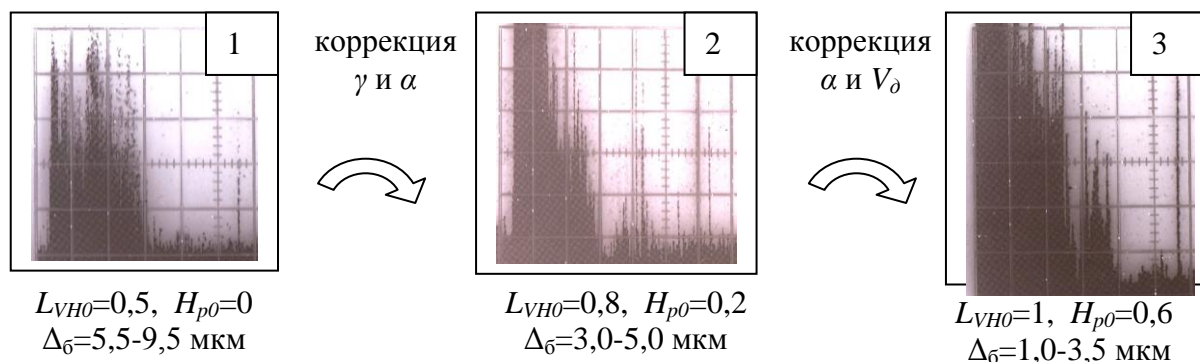


Рис. 24. Направленная коррекция управляющих параметров настройки и режимов с применением ВХП

Глава 7 завершается описанием интегрированной модельной среды и программного комплекса для виртуальной ДТШО, прогнозированию точности обработки, анализа результатов управляющих воздействий.

На основе принятого концептуального подхода процесс формообразования при ДТШО представлен как взаимосвязанное сочетание четырех функциональных процессов: 1 – формирования ТП; 2 – прямого целевого формообразования заготовок; 3 – обратного формообразования – трансформации ТП; 4 – исходной генерации поверхности ШК в результате правки. Концептуальный подход, структурно-функциональные модели, совокупность методов и методик представляют собой методологическую платформу для построения комплекса математических моделей, алгоритмического и программного обеспечения.

Созданная методологическая и модельная среда открывает возможности: реализации виртуальной обработки заготовок, корректность которой подтверждена удовлетворительным совпадением результатов численных и натуральных экспериментов; анализа влияния технологических факторов на процессы 1 – 4; прогнозирования топографии и лимитирующих погрешностей обработанных поверхностей в произвольный момент времени; анализа трансформации ТП и искажения заданной формы ШК в процессе шлифования партии заготовок; интерактивного синтеза управляющих технологических параметров.

Для практической реализации перечисленных возможностей модельной среды создан и официально зарегистрирован программный комплекс «Моделирование процесса ДТШО» (начальные экранные формы, характеризующие возможности программы приведены на рис. 25). Программный комплекс содержит три основные модуля – моделирование ТП (МТП), трансформации ТП (МТПП), формообразования обрабатываемых поверхностей (МФОП) и submodule - особенности схемы и кинематики, динамики, базирования и учета тепловых смещений. Каждый submodule имеет разветвленную структуру. Вывод результатов предусмотрен как в табличной, так и в графической форме. На рис. 26 приведен пример визуализации текущей обрабатываемой поверхности с идентифицированной мгновенной поверхностью шлифования.

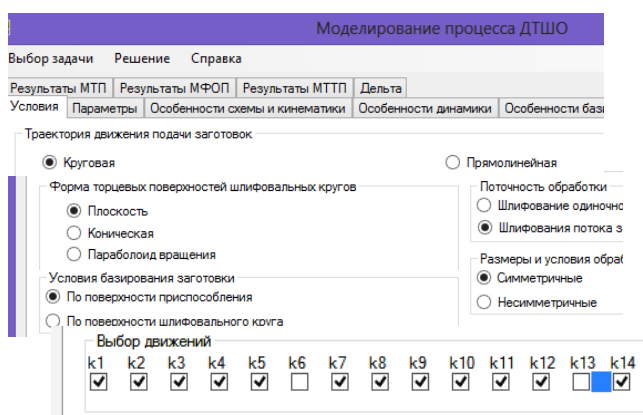


Рис. 25. Примеры начальных экранных форм программного комплекса

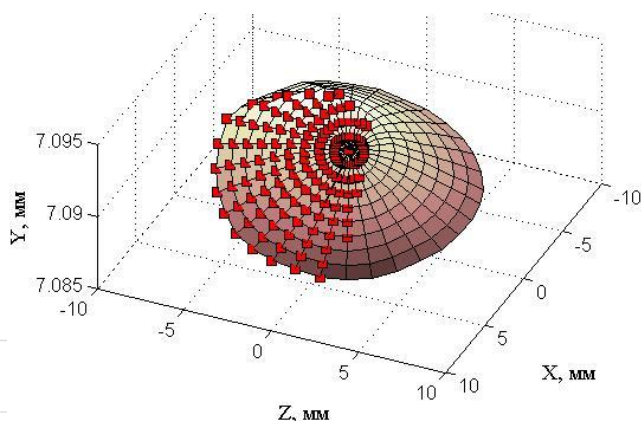


Рис. 26. Пример текущей обрабатываемой поверхности с выделенной МПШ

Программный комплекс разработан в интегрированной среде Visual Studio Express с использованием технологии Microsoft (MS) .NET Framework 4.0 и системы GNU Octave для вывода трехмерных графиков, интерполяции и численного дифференцирования.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В диссертации изложены научно-обоснованные технические и технологические решения по управлению процессом формообразования при ДТШО, реализация которых вносит значительный вклад в развитие экономики страны, заключающийся в повышении качества изделий машиностроения.

1. Предложена классификация известных и возможных способов ДТШО на основе выявленной совокупности идентификационных схемно-конструктивных и факторных признаков, отображаемых в виде идентификационной матрицы и векторов и используемых для установления расчетной схемы и функции реального формообразования.

2. На основе предложенного концептуального подхода представления поточной шлифовальной обработки как процесса взаимного континуального формообразования заготовок и инструментов в развитие прикладной теории технологического формообразования разработана математическая модель текущих обрабатываемых поверхностей в произвольный момент процесса съема припуска при переменных функциях позиционирования и инструмента, имеющих в качестве аргументов как схемно-конструктивные, так и факторные идентификаторы формообразования, что позволяет оценить их влияние на формирование выходных характеристик точности обработки.

3. Комплексное теоретико-экспериментальное исследование позволило установить и научно обосновать принципы управления процессом формообразования при ДТШО, направленные на обеспечение требуемой точности обработки: обеспечение рациональной формы технологического пространства, реализация на основе установленных взаимосвязей требуемых кинематических характеристик движения заготовок, обеспечение формоустойчивости производящих поверхностей ШК под воздействием потока заготовок, обеспечение условия постоянства контакта заготовки и ШК, ограничение системных динамических смещений заготовок и ШК.

4. Разработана методологическая и модельная среда управления процессом формообразования при ДТШО, включающая систему моделей:

- формирования технологического пространства при обработке потока заготовок и одиночной заготовки, учитывающая переменность силового воздействия со стороны обрабатываемых заготовок, асимметрию условий обработки для двух оппозитных торцов, траекторию движения подачи, позволяющая реализовать рациональный цикл съема припуска с требуемым ограничением динамических смещений ШК;

- трансформации технологического пространства при шлифовании потока заготовок (модель обратного формообразования), позволяющая прогнозировать изменение формы рабочих поверхностей ШК и проводить выбор управляющих параметров с учетом ограничений функции линейной трансформации профиля;

- динамического реального формообразования обрабатываемых поверхностей в процессе съема припуска (модель прямого формообразования) при двух вариантах базирования заготовки - по поверхности приспособления и по поверхности ШК, позволившая установить взаимосвязи управляющих параметров процесса обработки, геометрических, кинематических, динамических факторов формообразования с текущими и выходными погрешностями обрабатываемых торцов;

- анализа и синтеза формообразующей системы правки ШК, позволяющая реализовать требуемую исходную функцию инструмента в уравнении прямого формообразования, исходя из заданных параметров геометрической модификации ШК.

5. Для реализации принципов управления процессом формообразования разработана система критериальных условий и функциональных ограничений, исходя из

которых производится синтез эффективных значений управляющих параметров процесса ДТШО, включая параметры настройки станка и режимов шлифования, по предложенным методикам.

6. Предложен концептуальный подход представления ДТШО как особой разновидности врезного шлифования с управлением по относительному сближению профилей шлифовальных кругов, задаваемых формой технологического пространства, позволивший при математическом описании процесса использовать известные понятия теории шлифования, и доказана его адекватность; расширен понятийно-определяющий аппарат ДТШО.

7. В результате комплексного экспериментального исследования ДТШО свободных заготовок доказана доминирующая роль реальных геометрических и кинематических факторов в формировании точности обработки; определены области значений показателей характеристики вращения, обеспечивающие минимизацию лимитирующих погрешностей торцов; установлено влияние взаимного положения ШК, снимаемого припуска и скорости подачи на показатели характеристики вращения и точность обработки; обоснована возможность высокопроизводительной обработки изделий с величинами припуска и скорости подачи из верхнего диапазона значений, применяемых в производственных условиях; установлен факт и необходимые условия образования квазиизотропного микрорельефа, обеспечивающего снижение высоты микронеровностей по показателям  $R_z$  и  $R_a$  на 14-18% и рациональные параметры распределения относительной опорной длины профиля.

8. На основе разработанной модельной среды создан программный комплекс виртуальной ДТШО с возможностью определения характеристик и визуализации объектов формообразования при заданных фазовых параметрах процесса, анализа результатов управляющих воздействий и прогнозирования точности обработки.

9. В результате вычислительных экспериментов, проведенных при вариациях геометрических, кинематических, динамических факторов, выявлены закономерности формирования погрешностей обработанных поверхностей и трансформации производящих поверхностей ШК, подтвержденные данными лабораторных и производственных испытаний.

10. Предложены конструкторско-технологические решения по совершенствованию формообразующей системы станка, среди которых способы принудительного вращения цилиндрических заготовок, обеспечивающие снижение торцового биения до 2 раз; инновационная конструкция двухзонного ШК с гетерогенными свойствами, позволившая увеличить период шлифования партий подшипниковых колец до момента необходимой правки кругов в 1,25-1,75 раз; устройства для правки шлифовальных кругов с модифицированным профилем производящей поверхности.

11. Разработан метод оперативной направленной коррекции управляющих параметров настройки станка и режимов шлифования с использованием предложенного способа виброакустической диагностики процесса ДТШО, основанного на обнаруженном эффекте возбуждения высокочастотных колебаний динамической системы станка вращающейся заготовкой; доказана его эффективность.

12. Эффективность технологического управления формообразованием выражается в повышении точности обработанных поверхностей за счет обоснованного выбора геометро-кинематических и упруго-силовых характеристик формообразующей системы и в повышении производительности обработки за счет увеличения периода времени между правками ШК, обоснованной интенсификации режимов, снижении времени на настройку станка. Методики и технические решения подтверждены па-

тентами, прошли апробацию, внедрены или приняты к внедрению. Ожидаемый годовой экономический эффект только от внедрения на ВПЗ двухзонного шлифовального круга с модифицированной рабочей поверхностью для обработки колец подшипников составляет 1,7 млн. руб.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

***Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ***

1. Вайнер Л. Г. Повышение точности шлифования торцов роликов / Л. Г. Вайнер, С. С. Шахновский // Станки и инструмент. 1985. №5. - С. 30-31.
2. Вайнер Л. Г. Исследование характера движения цилиндрических роликов при обработке на двусторонних торцешлифовальных станках / Л.Г. Вайнер // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. №4 (282). - С. 49-54.
3. Вайнер Л. Г. Влияние кинематики процесса двустороннего шлифования торцов деталей на точность обработки / Л. Г. Вайнер // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. №5-2 (283). - С. 41-46.
4. Вайнер Л. Г. Характер вращения роликов и точность обработки при двустороннем торцешлифовании [Текст] / Л. Г. Вайнер // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2010. №4(19) . - С. 111-120.
5. Вайнер Л. Г. Виброакустический контроль двустороннего торцешлифования в производственных условиях / Л. Г. Вайнер, В. А. Ривкин // Вестник машиностроения. 2011. №7. - С. 60-64.
6. Вайнер Л. Г. Использование виброакустических эффектов для диагностики процесса двусторонней торцешлифовальной обработки / Л. Г. Вайнер, А. В. Ривкин // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2011. №3. - С. 80-82.
7. Вайнер Л. Г. Расчет технологических параметров при двустороннем шлифовании торцов свободных заготовок с учетом асимметрии условий обработки / Л. Г. Вайнер // Вестник Донского государственного технического университета. 2012. № 4 (65). - С. 70-76.
8. Вайнер Л. Г. Методологические аспекты определения технологических характеристик при шлифовании торцовых поверхностей / Л. Г. Вайнер // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2012. № 2. - С. 13-20.
9. Вайнер Л. Г. Определение параметров технологического пространства при двусторонней торцешлифовальной обработке / Л. Г. Вайнер // Вестник машиностроения. 2011. № 12, с. 72–77.
10. Вайнер Л. Г. Характеристики рабочего пространства при двусторонней торцешлифовальной обработке потока заготовок / Л. Г. Вайнер // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4/2 (288) . - С. 32–37.
11. Вайнер Л. Г. Методология построения модели реального формообразования в процессе съема припуска на примере шлифования торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-6 (292). - С. 21–27.
12. Вайнер Л. Г. Моделирование процесса съема припуска при шлифовании торцов одиночной заготовки / Л. Г. Вайнер // Вестник машиностроения. 2012. № 11. - С. 68–72.
13. Вайнер Л. Г. Повышение эффективности процесса торцешлифовальной обработки с применением двухкомпонентных абразивных инструментов / Л. Г. Вайнер // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2012. №4(27).- С. 115-124.



14. Вайнер Л. Г. Определение геометрических характеристик двухкомпонентных шлифовальных кругов для двусторонней обработки торцов деталей / Л. Г. Вайнер // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 1. - С. 11-16.

15. Вайнер Л. Г. Анализ динамических смещений заготовок в процессе шлифования торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер, И. В. Карабанов // Вестник РГА-ТУ. 2013. № 1(24). - С. 50-55.

16. Вайнер Л. Г. Модель износа шлифовальных кругов при двустороннем торцешлифовании с прямолинейной подачей заготовок / Л. Г. Вайнер, В. А. Носенко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2013. № 3(48). - С. 88-91.

17. Вайнер Л. Г. Особенности формообразования оппозитных торцевых поверхностей с учетом действия системных динамических факторов / Л. Г. Вайнер, А. Г. Ивахненко, И. В. Карабанов // СТИН. 2013. № 10. - С. 28-34.

18. Вайнер Л. Г. Анализ закономерностей изнашивания шлифовальных кругов при двусторонней обработке торцов колец подшипников / Л. Г. Вайнер, В. А. Носенко, А. Э. Сафронов // Вестник Тихоокеанского государственного университета. 2013. №3(30). - С. 111-118.

### ***Монографии***

19. Вайнер Л. Г. Исследование возможностей повышения точности и производительности процесса двустороннего торцевого шлифования / Л. Г. Вайнер // Моделирование технологических процессов абразивной обработки: Коллективная монография / Г. В. Барсуков, Л. Г. Вайнер, Ю. В. Василенко и др., всего 10 чел.; Под ред. Ю.С. Степанова и А.В. Киричека - М.: Изд. дом «Спектр», 2011. – Разд. 2. – С. 63–98.

20. Степанов Ю. С. Анализ систем и процессов реального формообразования оппозитных торцевых поверхностей при двустороннем шлифовании / Ю. С. Степанов, Л. Г. Вайнер // Моделирование технологических процессов механической обработки и сборки. Том 1. Коллективная монография / А. Ю. Албагачиев, Ю. А. Албагачиев, А. В. Балыков и др., всего 12 чел.; Под ред. А. В. Киричека - М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – Разд. 5. – С. 227-277.

### ***Патенты РФ***

21. Авторское свид. № 1313675 от 1.02.1987. Способ настройки двустороннего торцешлифовального станка для обработки роликов / Каминская В. В., Вайнер Л. Г., Ривкин В. А., Цейтлин Л. Н., Шахновский С. С. (СССР). Бюл. №20, 1987, 4 с.

22. Патент № 2464147 РФ, МПК В24В7/17, В24В49/10. Способ двусторонней обработки торцов роликов шлифовальными кругами / Вайнер Л. Г.; заявл. 27.12.2010; опубл. 20.10.2012. Бюл. № 29.

23. Патент № 2455142 РФ, МПК В24В7/17. Способ двустороннего торцевого шлифования цилиндрических деталей / Вайнер Л. Г.; заявл. 27.12.2010. опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

24. Патент № 2463150 РФ, МПК В24В7/17. Способ двустороннего торцевого шлифования цилиндрических деталей / Вайнер Л. Г.; заявл. 27.12.2010. опубл. 10.07.2012. Бюл. № 19.

25. Патент № 121465 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для двустороннего шлифования торцов деталей / Вайнер Л. Г.; заявл. 26.12.2011; опубл. 27.10.2012. Бюл. № 30.

26. Патент № 115278 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для двустороннего шлифования торцов деталей / Вайнер Л. Г., Богачев А. П., Иванов В. А.; заявл. 24.11.2011; опубл. 27.04.2012. Бюл. № 12.

27. Патент № 114901 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для двустороннего шлифования торцов деталей / Вайнер Л. Г., Богачев А. П., Давыдов В. М.; заявл. 24.11.2011; опубл. 20.04.2012. Бюл. № 11.

28. Патент № 126980 РФ, МПК В24В7/17. Устройство для правки торцевых поверхностей шлифовальных кругов / Вайнер Л. Г., Богачев А. П., Флусов Н. И.; заявл. 03.08.2012; опубл. 20.04.2013. Бюл. № 11.

*Статьи в других отечественных и зарубежных изданиях (всего 39)*

29. Vayner L. G. Increasing technological possibilities of two sides workpiece grinding / L. G. Vayner // Abstracts. The first Soviet Union-China Symposium: The actual problems of the scientific and technological progress of the Far Easten region on the base of Soviet Union-China direct cooperation. Khabarovsk, 1991, pp. 137-141.

30. Vayner L. G. Increasing Exactness of Making Bearing Races and Rollers/ L.G. Vayner, S.S. Shakhnovskiy // Proceeding. The second international simposium in promotion of scientific and technological progress in the Far East. Harbin, P.R.C., 1992, pp. 282-283.

31. Вайнер Л. Г. Моделирование формы рабочего пространства при двустороннем торцешлифовании / Л. Г. Вайнер // Теоретические и прикладные вопросы современных информационных технологий. Материалы Всероссийской научно-техн. конф. Ч.1. - Улан-Уде: Изд-во ВСГТУ, 2001. - С. 79-82.

32. Вайнер Л. Г. Системные особенности процесса двустороннего торцешлифования / Л. Г. Вайнер // «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии на предприятиях машиностроения, авиастроения, транспорта и сельского хозяйства». Труды Международной научно-техн. конф. – Ростов н/Д: ИЦ ДГТУ, 2010, с. 558-560.

33. L. G. Vainer. Determining the parameters of the technological space in bilateral end grinding / Russian engineering research. 2011, vol. 31, No. 12, pp. 1233-1238.

34. Вайнер Л. Г. Моделирование процесса двусторонней торцешлифовальной обработки / Л. Г. Вайнер // Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ – 2011) [Текст]+[Электронный ресурс]: Сб. тр. 3-й междунар. науч.-техн. конф., г. Брянск, 19 – 20 мая 2011г. / Под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск: Десяточка, 2011. - С. 24-25.

35. Vayner L. G. The characteristics of the working space at double-disc grinding // Modern materials and technologies 2011: International Russian-Chinese Simposium. Proceedings. – Khabarovsk : Pasific National University, 2011. - С. 363-368.

36. Вайнер Л. Г. Реализация модульного принципа при разработке многовариантной модели реального формообразования торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях: сборник научных статей III Международной научно-практической конференции / ред. кол.: В. А. Кабанов (отв. ред.) [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. - С. 96-100.

37. Вайнер Л. Г. Динамика технологического пространства при формообразовании торцов заготовок в процессе двустороннего шлифования / Л. Г. Вайнер // Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях. – Рыбинск: РГАТУ имени П. А. Соловьева, 2012. – Ч. I. - С. 305-308.

38. Вайнер Л. Г. Особенности формирования макрогеометрии торцевых поверхностей заготовок в процессе шлифования / Л. Г. Вайнер // Научные труды II Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – Москва: ИМАШ РАН, 2012. - С. 139-144.

39. Вайнер Л. Г. Виртуальное отображение процесса шлифовальной обработки торцевых поверхностей / Л. Г. Вайнер, И. В. Карabanов // Современные материалы,

техника и технология [Текст]: материалы 2-й Международной научно-практической конференции (25 декабря 2012 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2012. - С. 82-84.

40. Вайнер Л. Г. Методологические аспекты проектирования технологической операции шлифовальной обработки торцов / Л. Г. Вайнер // Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии [Текст]: сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012 г. / под общ. ред. проф. А. М. Козлова. – Ч. 1. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012, с. 74-79.

41. Вайнер Л. Г. Геометрическая модификация торцешлифовальных кругов в процессе правки / Л. Г. Вайнер, Н. И. Флусов // Новые материалы и технологии в машиностроении / Под общей редакцией Е. А. Памфилова. Сборник научных трудов по итогам международной научно-технической конференции. Выпуск 17. – Брянск: БГИТА, 2013. - С. 14-15.

42. Вайнер Л. Г. Математическое моделирование износа шлифовальных кругов на операции двустороннего торцешлифования с прямолинейной подачей заготовок / Л. Г. Вайнер, В. А. Носенко // Машиностроение – основа технологического развития России ТМ-2013: сб. науч. ст. V Междунар. науч.-техн. конф. / редкол.: Е. И. Яцун [и др.]; Юго-Зап. гос. ун-т. Курск, 2013. - С. 203-208.

43. L. G. Vainer. Margin removal in grinding the ends of single blank / Russian engineering research. 2013, vol. 33, No. 3, pp. 140-143.

44. Вайнер Л. Г. Совершенствование процесса правки торцешлифовальных кругов / Л. Г. Вайнер, Н. И. Флусов // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: Сборник трудов международной научно-технической конференции (г. Ростов-на-Дону, 28 февраля 2013). – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. - С. 403-406.

45. Вайнер Л. Г. Интегрированная торцешлифовальная обработка двухкомпонентными инструментами / Л. Г. Вайнер, В. А. Носенко // Научоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов // Сборник трудов международной научно-технической конференции (г. Ростов-на-Дону, 9-12 октября. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2013. - С. 136-138.

***Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (всего 6)***

46. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012610618, дата регистрации 10.01.2012. Модель технологического пространства при поточной двусторонней торцешлифовальной обработке / Л. Г. Вайнер, И. В. Карабанов.

47. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618844, дата регистрации 28.09.2012. Модель формирования обрабатываемых поверхностей при двусторонней торцешлифовальной обработке с круговой подачей заготовок / Л. Г. Вайнер, И. В. Карабанов.

48. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618845, дата регистрации 28.09.2012. Модель формирования обрабатываемых поверхностей при двусторонней торцешлифовальной обработке с прямолинейной подачей заготовок / Л. Г. Вайнер, И. В. Карабанов.

49. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2012618894, дата регистрации 02.10.2012. Трехмерная визуализация формообразования оппозитных торцевых поверхностей деталей при шлифовании / Л. Г. Вайнер, И. В. Карабанов; правообладатель ФГБОУ ВПО «Тихоокеанский государственный университет».

ВАЙНЕР Леонид Григорьевич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ  
ПРИ ДВУСТОРОННЕЙ ТОРЦЕШЛИФОВАЛЬНОЙ ОБРАБОТКЕ

Автореферат

Подписано в печать 28.10.2013. Формат 60x84/16.  
Бумага писчая. Гарнитура «Таймс»  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0  
Уч.-изд. л. 2.0 Тираж 120 экз. Зак. №\_\_\_\_  
Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского  
государственного университета  
680035, г. Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136