

На правах рукописи



БОЧКОВА Дина Евгеньевна

**ФОРМООБРАЗОВАНИЕ КРУГОВЫХ ЗУБЬЕВ ПАРЫ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОЛЁС С ЛОКАЛИЗОВАННОЙ
ЗОНОЙ КАСАНИЯ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тула 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Бобков Михаил Николаевич

Официальные оппоненты: Козлов Александр Михайлович,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»,
заведующий кафедрой

Андрианов Павел Алексеевич,
кандидат технических наук,
АО «Конструкторское бюро приборостроения
им. академика А.Г. Шипунова», г. Тула,
начальник отдела производственных мощностей

Ведущая организация - ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет»

Защита состоится « 02 » апреля 2019 г. в 14-00 час. на заседании диссертационного совета Д 212.271.01 при ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300012, г. Тула, ГСП, просп. Ленина, д. 92, 9-101).

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Bochkova_DE/

Автореферат разослан « 08 » февраля 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существенное улучшение эксплуатационных характеристик тяжело нагруженных и высокоскоростных цилиндрических зубчатых передач может быть достигнуто за счёт применения колёс с арочными зубьями. Благодаря увеличению коэффициента перекрытия и отсутствию осевой силы в зацеплении арочные зубья позволяют повысить плавность работы, снизить шум и вибрацию, упростить конструкцию подшипниковых узлов. В результате сложения монтажных погрешностей положения осей в пространстве с упругими деформациями валов и других деталей будет иметь место перекося осей и, как следствие, кромочный контакт зубьев на их торцах и вершинах. Устранить опасность кромочного контакта в зацеплении и повысить прочность зубьев можно за счёт локализации зоны касания зуба по его длине и высоте путём совокупной профильной и продольной модификации зубьев. Известные способы обработки таких колёс позволяют осуществить профильную модификацию лишь с помощью инструмента, производящий контур которого очерчен ломаной линией или прямой в сочетании с окружностью. Это усложняет проектирование, изготовление, контроль и эксплуатацию такого инструмента. Кроме того, для достижения требуемых значений высоты и глубины профильной модификации при производстве колёс одинакового модуля, но с различными значениями коэффициента смещения исходного контура потребуются разные инструменты, что приведёт к ещё большему удорожанию производства.

В связи с изложенным **актуальным** является теоретическое и экспериментальное обоснование технологии формообразования арочных зубьев пары цилиндрических колёс и синтез параметров станочных зацеплений, обеспечивающие локализацию контакта с достижением требуемых¹ размеров, формы и расположения зоны касания зуба без усложнения конструкции инструмента и расширения его номенклатуры.

Отдельные разделы работы выполнялись в соответствии с государственным заданием в рамках НИР №7.1439.2011 «Базовые промышленные технологии формообразования зубьев цилиндрических колёс для создания перспективных видов вооружения».

Цель работы. Целью работы является научное обоснование технологии обработки круговых зубьев пары цилиндрических колёс, обеспечивающей улучшение эксплуатационных характеристик передачи в реальных условиях зацепления за счёт локализации контакта.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи.

1 Проанализировать научно-технические публикации по теме диссертации с целью постановки задач исследования.

¹ Под требуемыми (заданными) размерами и расположением зоны касания зуба понимаются размеры и расположение, соответствующие ГОСТ 1643-81 или назначенные конструктором передачи.

2 Разработать способ формообразования круговых зубьев пары цилиндрических колёс, обеспечивающий выполнение технологических операций с достижением требуемой локализации зоны касания зуба в рабочем зацеплении за счёт его продольной и профильной модификации.

3 Определить геометрические параметры станочных и рабочего зацеплений шестерни и колеса в среднем сечении, необходимые для проектирования зуборезного инструмента и наладок зубообрабатывающих станков.

4 Провести геометрический и кинематический анализ станочного зацепления шестерни с производящим колесом (ПК), на основе которого разработать математическое обеспечение процесса формообразования модифицированных зубьев и определить параметры выпуклой и вогнутой боковых поверхностей зуба.

5 Провести геометрический и кинематический анализ станочного зацепления шестерни с производящей рейкой с целью определения параметров боковых поверхностей зуба шестерни, служащих отсчётными теоретическими поверхностями при нахождении границы зоны касания зуба в рабочем зацеплении. Разработать методику определения координат точек линии уровня приведённых зазоров, являющейся границей зоны касания зуба.

6 Разработать методику автоматизированного расчёта геометрических параметров станочных и рабочего зацеплений, включающую определение границы зоны касания зуба, наладок зубообрабатывающих станков и параметров зуборезных инструментов.

7 Выполнить компьютерное моделирование, аспектом исследования которого являются параметры станочных и рабочего зацеплений, определяющие закономерность изменения размеров и формы зоны касания зуба.

8 Обосновать выбор конструкции нестандартной зуборезной головки (ЗГ) с незатылованными резцами и разработать методику расчёта параметров таких инструментов и наладок зубообрабатывающих станков.

9 С целью подтверждения соответствия модели моделируемому объекту изготовить и проконтролировать по нормам точности, в том числе на контрольно-обкатном станке, опытные образцы зубчатых колёс.

10 Использовать результаты исследования в промышленности и учебном процессе.

Объект исследования – операции формообразования круговых зубьев цилиндрических колёс.

Предмет исследования – станочные зацепления пары цилиндрических колёс с круговыми зубьями, обеспечивающие требуемую локализацию зоны касания зуба в рабочем зацеплении.

Научная новизна:

- установлена и формализована взаимосвязь геометрических параметров станочных и рабочего зацеплений пары цилиндрических колёс с круговыми зубьями с координатами линии уровня приведённых зазоров, ограничивающей зону касания зуба, параметрами инструмента и наладки зубообрабатывающего станка;

- разработана геометрическая аналитическая модель станочных зацепле-

ний, обеспечивающих требуемую локализацию контакта в рабочем зацеплении по длине и высоте зуба, позволяющая управлять размерами, формой и расположением зоны касания за счёт изменения параметров инструмента и наладки станка.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предложенный метод синтеза геометрии станочных зацеплений пары цилиндрических колёс с круговыми зубьями, обеспечивающий требуемую локализацию зоны касания зуба в рабочем зацеплении, дополняет и расширяет теорию и геометрию цилиндрических зубчатых передач, проектирования зуборезного инструмента.

Практическая значимость результатов работы заключается:

- в технологии формообразования круговых зубьев цилиндрических колёс, обуславливающей повышение эксплуатационных характеристик тяжёлонагруженных и высокоскоростных передач за счёт локализации контакта по длине и высоте зуба;

- в сокращении времени подготовки производства цилиндрических колёс с круговыми зубьями посредством моделирования процессов формообразования с помощью созданного программного комплекса;

- в полученных зависимостях для определения наладок зубообрабатывающих станков и параметров зуборезных головок.

Методы исследования. При выполнении работы теоретические исследования базировались на основных положениях технологии машиностроения и проектирования зуборезного инструмента, теории и геометрии зубчатых зацеплений, методах аналитической и дифференциальной геометрии. Моделирование модифицированной и отсчётной теоретической поверхностей зуба шестерни осуществлялось с использованием программного комплекса Компас-3D, расчёты координат точек боковых поверхностей зубьев и линии уровня приведённых зазоров выполнялись при помощи разработанной программы для ЭВМ. Экспериментальное нарезание зубьев проводилось на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ ОЦ-1И22, изготовленные колёса контролировались стандартными средствами измерения.

Положения, выносимые на защиту:

- способ обработки круговых зубьев пары цилиндрических колёс, обеспечивающий локализацию контакта в рабочем зацеплении по длине и высоте зуба;

- методики определения параметров станочного зацепления шестерни с ПК и геометрических параметров выпуклой и вогнутой сторон зуба, параметров станочного зацепления шестерни с производящей рейкой и геометрических параметров боковых поверхностей зуба, являющихся отсчётными теоретическими поверхностями при определении границы зоны касания зуба;

- методика определения координат точек линий уровня приведённых зазоров;

- методика автоматизированного расчёта геометрических параметров станочных и рабочего зацеплений, включающая определение границы зоны касания зуба и позволяющая управлять её размерами;

- математическая модель, аспектом исследования которой являются параметры станочного и рабочего зацеплений, определяющие закономерность изменения размеров и формы зоны касания зуба;

- результаты изготовления и контроля точности опытных образцов зубчатых колёс.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов базируется на корректном применении основных положений теории и геометрии зубчатых передач, методов аналитической и дифференциальной геометрии и подтверждена соответствием результатов компьютерного моделирования и контроля изготовленных зубчатых колёс.

Соответствие диссертации паспорту специальности. По теме и содержанию работа соответствует специальности 05.02.07 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части п. 4 раздела «Области исследований»: создание, включая проектирование, расчёты и оптимизацию параметров, инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки. Согласно формуле специальности в ней «...изучаются закономерности и взаимосвязи в технологических процессах формообразования тел (деталей) путём удаления части начального объёма материала...».

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на ежегодных научно-технических конференциях ТулГУ с 2008 по 2018 г., на XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии – ТЕХНОЛОГИЯ-2012» (Орёл, 2012 г.), на международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии» (Липецк, 2012 г.), на VIII Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015 г.), на IX Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016 г.), на международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Коганова И.А. «Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин» (Тула, ТулГУ, 2016 г.), на международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Лашнева С.И. «Современные проблемы обработки материалов резанием, проектирования и технологии изготовления сложного режущего инструмента» (Тула, ТулГУ, 2017 г.).

Реализация результатов работы. Предложенная технология формообразования круговых зубьев подтверждена патентом на изобретение и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ. Методики расчёта геометрических параметров станочных и рабочего зацеплений, зуборезных инструментов и наладок станков, а также соответствующее программное обеспечение приняты в АО «КБП им. академика А.Г. Шипунова» для использования при проектировании зубчатых передач новых изделий и разработке технологических процессов их изготовления. Отдельные результаты исследования используются в учебном процессе на кафедре «Техноло-

гия машиностроения» ТулГУ при подготовке инженеров по специальности 15.05.01 «Проектирование технологических машин и комплексов» и магистров по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Публикации. По теме диссертации опубликованы 14 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, один патент РФ на изобретение и программа для ЭВМ, прошедшая государственную регистрацию.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списков условных обозначений и терминов, списка литературы из 110 наименований, 4 приложений. Работа изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 113 рисунков. Общий объём – 358 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель исследования, научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе определена область рационального применения цилиндрических колёс с арочными зубьями, проанализированы методы обработки арочных зубьев, рассмотрены виды, эффективность и способы модификации зубьев.

Первое упоминание о цилиндрических колёсах с арочными зубьями относится к началу прошлого столетия. В 1909 г. П. Боттхер (США) запатентовал такое колесо. В дальнейшем, примерно с середины XX века в нашей стране и за рубежом стали появляться публикации о проектировании, изготовлении и применении цилиндрических передач с арочными зубьями. Интерес к ним был обусловлен повышением требований к несущей способности зубчатых передач, к их виброустойчивости, а также необходимостью снижения чувствительности к монтажным и динамическим погрешностям положения осей колёс в пространстве при одновременном сохранении требований по технологичности.

В настоящее время известны три основных метода формообразования арочных зубьев: метод обката с единичным делением, метод обката с непрерывным делением для нарезания колёс с циклоидальной линией зубьев и метод обката с непрерывным делением, при котором используется спирально-дисковая фреза. Значительный вклад в изучение и теоретическое обоснование этих методов при обработке конических и цилиндрических колёс внесли А.Э. Волков, М.И. Догота, М.И. Евстигнеев, М.Л. Ерихов, А. Ichibashi, И.А. Коганов, L. Kotsch, А.А. Кравчук, А.Н. Красулин, В.Л. Малеин, В. Mammano, В.И. Медведев, Э.В. Ратманов, Л.Н. Решетов, В.Н. Севрюк, М.Г. Сегаль, А.К. Сидоренко, А.Е.Скляров, В.Н. Сызранцев, А.С. Тарапанов, Н.А. Шахбазов, Г.И. Шевелёва, Г.М. Шейнин и многие, многие другие исследователи. Сравнительный анализ методов выявил, что метод обката с единичным делением, уступая двум другим методам по производительности, существенно превосходит их по технологичности инструмента, простоте конструкции оборудования и оснастки второго порядка.

В работах Э.Л. Айрапетова, М.Д. Генкина, О.И. Косарева, М.С. Полоцкого, М.А. Рыжова, Ю.Н. Сухорукова, В.Н. Сызранцева и других авторов показано, что наиболее эффективным способом повышения плавности работы передачи, а следовательно, снижения динамических нагрузок и вибрации является модификация боковой поверхности зуба. Исследованиями, проведёнными О.И. Косаревым и В.Н. Рудницким, установлено, что повысить нагрузочную способность косозубых и шевронных передач можно путём устранения вибраций, возбуждаемых переменной жёсткостью зацепления и дискретным нагружением зубьев, посредством профильно-продольной модификации зубьев. Поэтому по аналогии с зацеплением косозубых и шевронных колёс можно с большой долей вероятности предположить, что уменьшение динамических нагрузок и повышение несущей способности высокоскоростных и тяжело нагруженных передач с арочными зубьями также могут быть достигнуты за счёт совместной профильной и продольной модификации зубьев.

Для локализации зоны касания круговых зубьев по высоте нами предложена схема обработки пары зубчатых колёс, при которой шестерню 1 обкатывают по производящему колесу 2 с впадинами, имеющими в среднем торцовом сечении трапецеидальный I_2 , а не эвольвентный профиль (рис. 1). В процессе обработки инструменту 3 сообщают главное движение D_{Γ} – вращение вокруг оси Y_2 , а заготовке – два вращательных движения $D_{s\omega 1}$ и $D_{s\omega 0}$ соответственно вокруг оси Z_{w1} заготовки и оси Z_0 ПК, согласованных таким образом, что её начальный цилиндр с радиусом r_{w1} катится без скольжения по неподвижной центроиде – начальному цилиндру ПК с радиусом r_{w0} .

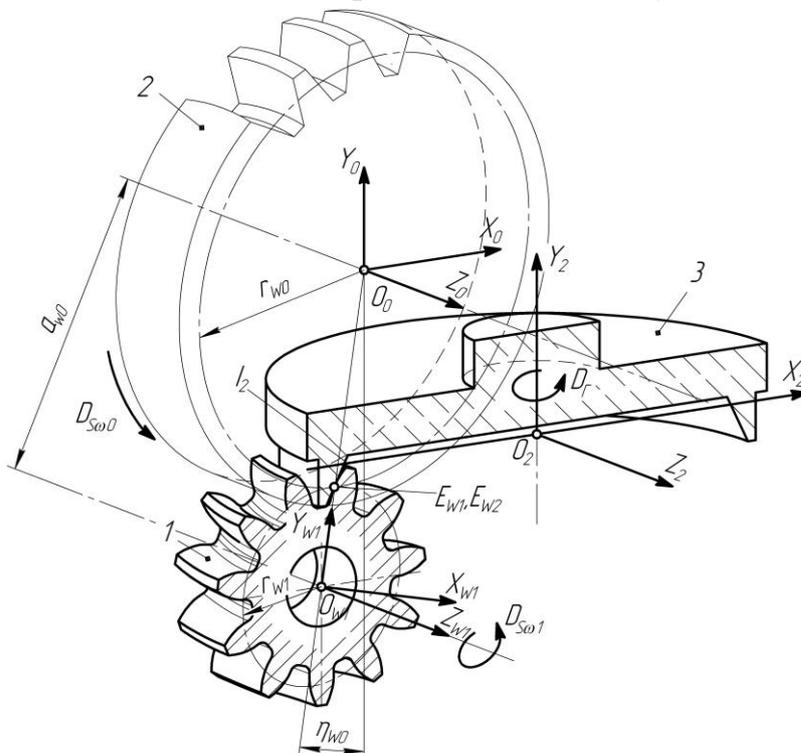


Рис. 1 – Схема обработки модифицированных зубьев шестерни

Глубина модификации и, следовательно, высота зоны касания зуба опре-

Ось Z_{w1} заготовки при этом перемещается по дуге окружности с радиусом, равным межосевому расстоянию a_{w0} станочного зацепления. Зубья колеса 2 передачи (рис. 2) формируются резцами головки 3 путём его обката по производящей рейке 4, а значит, имеют в среднем сечении немодифицированный эвольвентный профиль. Таким образом, локализация зоны касания по высоте зубьев происходит за счёт модификации профиля зубьев шестерни.

деляются значением радиуса r_{w0} . Соответствующее этому радиусу движение оси заготовки реализуется посредством управляющей программы путём совместных взаимосвязанных перемещений стола станка и заготовки вдоль осей X_0 и Y_0 (рис. 1).

Далее в главе ставятся основные задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели.

Во второй главе разработана методика расчёта геометрических параметров процессов формообразования круговых зубьев пары цилиндрических колёс, приведены результаты теоретических исследований станочных и рабочего зацеплений, представлены зависимости для расчёта радиусов ЗГ для чистовой обработки зубьев шестерни с продольной модификацией и методика определения координат точек границы зоны касания зуба.

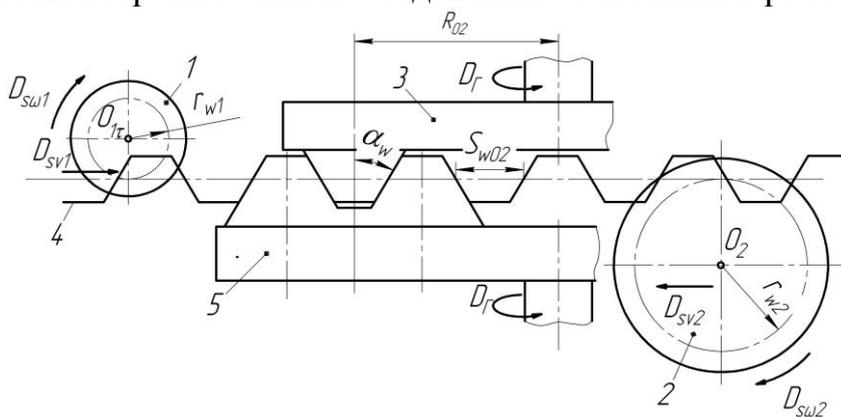


Рис. 2 – Схема станочного зацепления шестерни и колеса

Одной из задач, стоящих при конструкторско-технологической подготовке производства цилиндрических передач с арочными зубьями, является определение границы зоны касания зубьев шестерни и колеса. Для этого был использован метод, описанный в работах М.Г. Сегалю, при котором рассматриваются две взаимодействующие поверхности: модифицированная поверхность зуба шестерни и отсчётная теоретическая поверхность этого же зуба, определяемая как огибающая номинальной поверхности зуба парного с ним зубчатого колеса при их вращении. Поэтому, если зубья шестерни 1 (рис. 3)

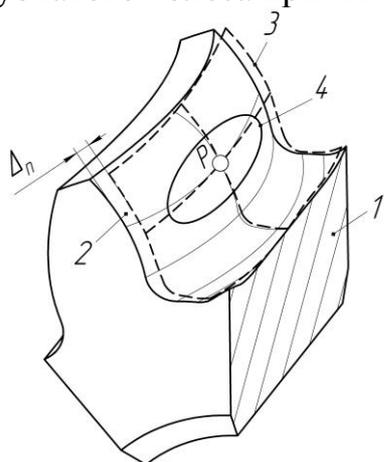


Рис. 3 – Модифицированная и отсчётная теоретическая поверхности зуба шестерни

имеют продольную и профильную модификацию, боковая поверхность 2 её зуба будет отведена от отсчётной теоретической поверхности 3 при их касании в точке P – центре зоны касания. Расстояние Δ_n между отсчётной теоретической поверхностью и модифицированной поверхностью зуба называется приведённым зазором, величина которого и определяет степень локализации контакта.

На боковой поверхности зуба шестерни расположены линии уровня 4, в точках которых приведённый зазор имеет постоянное значение. Д.т.н. Хлебалиным Н.Ф. установлено, что зона касания – это часть боковой поверхности зуба, ограниченная линией уровня, в точках которой выполняется условие

$$\Delta_n = 0,006 \sqrt{m_n}, \quad (1)$$

где m_n – нормальный модуль. Таким образом, задача определения размеров и формы зоны касания сводится к получению уравнений, описывающих модифицированную и отсчётную теоретическую поверхности зуба шестерни, а также нахождению координат точек линии уровня, для которой выполняется условие (1). Для этого, зная основные геометрические параметры передачи и законы движения инструмента и заготовки, воспользуемся методом преобразования координат, основанным на присвоении каждому из элементов рассматриваемой технологической системы жестко связанной с ним собственной системы координат. Расположим систему координат инструмента (см. рис. 1) так, чтобы ось Y_2 совместилась с осью вращения инструмента, а ось X_2 прошла на расстоянии радиуса r_{a1} окружности вершин зубьев от оси вращения заготовки. Ось Z_2 будет параллельна оси шестерни. Начало системы координат S_0 , связанной с ПК, расположим в средней торцовой плоскости колеса на его оси. При этом оси координат X_0, Y_0, Z_0 параллельны осям X_2, Y_2, Z_2 .

Режущая кромка I_2 инструмента в среднем торцовом сечении является образующей конической производящей поверхности, формирующей боковую поверхность зуба шестерни (см. рис. 1, 4). Исходное положение подвижной системы координат заготовки S_{w1} ($X_{w1}Y_{w1}Z_{w1}$) показано на рис. 1. После поворота шестерни на угол φ_1 вокруг оси ПК и на угол Φ_1 вокруг своей оси она займёт положение, изображённое на рис. 4. Система координат S_{w1} при этом преобразуется в систему S_1 ($X_1Y_1Z_1$), обработка зуба будет происходить в окрестности точки E_{t1} торцового сечения, лежащей на радиусе r_1 , а положение оси O_0 ПК определится координатами

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= -R_2 + r_{w0} \sin \frac{\pi}{z_0}, \\ y_0 &= r_{w0} + r_{w1} - r_{a1}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где R_2 – номинальный радиус чистовой резцовой головки;

z_0 – число зубьев ПК.

Координаты точки E_{w2} профиля зуба ПК в системе координат инструмента $x_{Ew2} = x_0 - r_{w0} \sin \eta_{w0}$, $y_{Ew2} = y_0 - r_{w0} \cos \eta_{w0}$.

Уравнения конической производящей поверхности, формируемой режущей кромкой I_2 инструмента, $x_2 = -\rho_2 \cos \theta_2$, $z_2 = \rho_2 \sin \theta_2$, где ρ_2 – радиус-вектор точки режущей кромки; θ_2 – параметр, фиксирующий точку E_{t2} торцового профиля I_{t2} зуба ПК. Координаты точки E_{t2} в системе S_2

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= -z_2 \operatorname{ctg} \theta_2, \\ y_2 &= y_{Ew2} - \left(\frac{z_2}{\sin \theta_2} + x_{Ew2} \right) \operatorname{ctg} \alpha_2, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\alpha_2 = \alpha_w + \eta_{w0}$ – угол профиля производящего контура (резца); α_w – угол зацепления.

Преобразуя системы координат и учитывая зависимости (2) и (3), получим уравнения, связывающие координаты торцового профиля производящей поверхности в системе S_2 с координатами торцового профиля зуба шестерни в системе S_1 ,

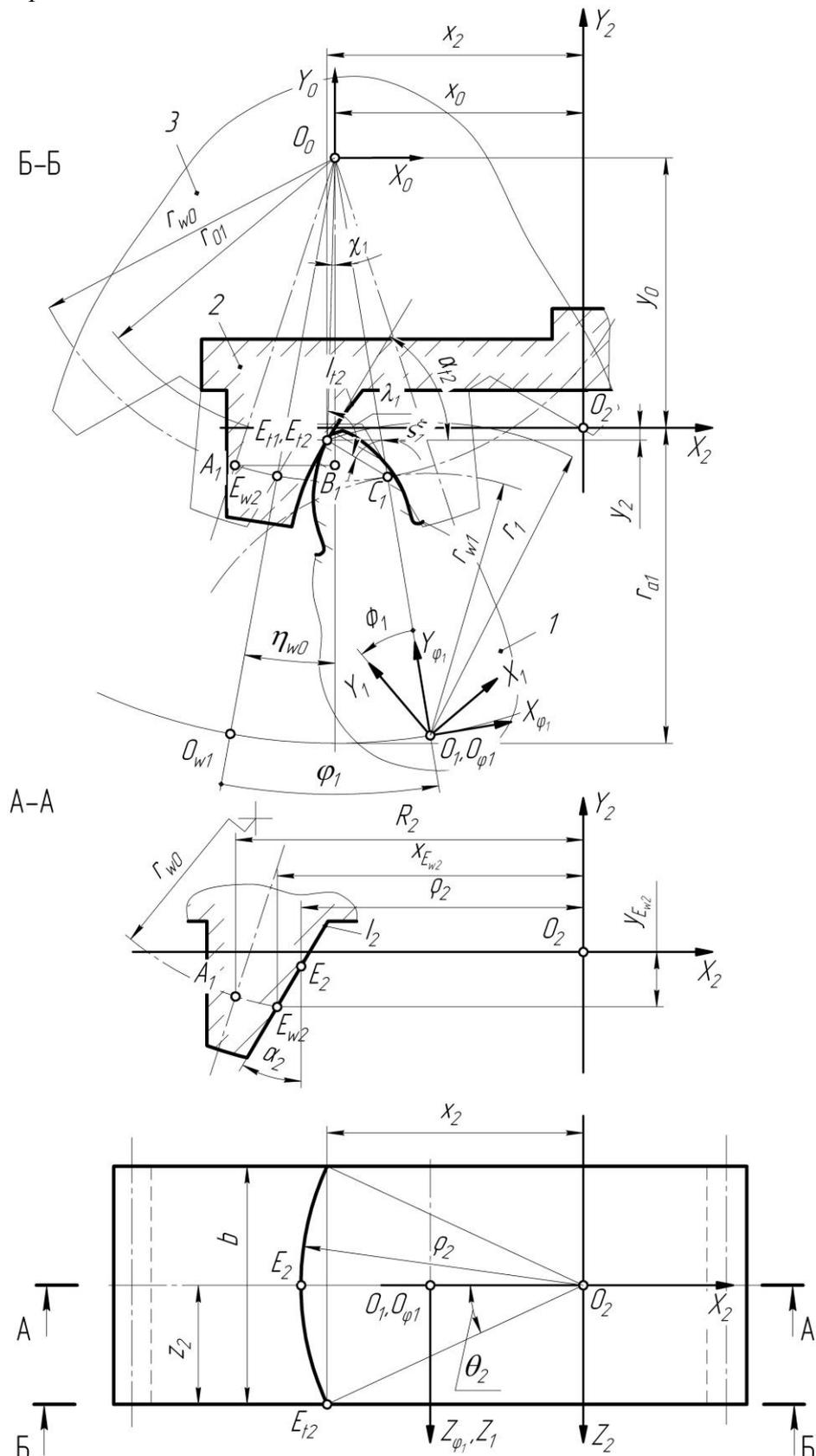


Рис. 4 – Схема к расчёту координат точек торцового профиля зуба

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= (x_2 - x_0) \cos \psi_1 + (y_2 - y_0) \sin \psi_1 + a_{w0} \sin \Phi_1, \\ y_1 &= (x_0 - x_2) \sin \psi_1 + (y_2 - y_0) \cos \psi_1 + a_{w0} \cos \Phi_1, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\psi_1 = \Phi_1 + \varphi_1 - \eta_{w0}$; $\Phi_1 = u_0 \varphi_1$ – фаза станочного зацепления шестерни; $\varphi_1 = \eta_{w0} + \alpha_{t2} - \xi_1$ – фаза станочного зацепления ПК; $u_0 = z_0 / z_1$ – передаточное число станочного зацепления; η_{w0} – угол между межосевой линией станочного зацепления шестерни и вертикалью.

В качестве отсчётной теоретической поверхности следует принять боковую поверхность зуба шестерни 1, сформированную по схеме (см. рис. 2), в которой шестерню и колесо 2 обкатывают по производящей рейке 4, чьи зубья материализуют резцы головок 5 и 3. При этом режущие кромки наружного витка головки 5 обрабатывают выпуклую сторону зуба шестерни, а режущие кромки внутреннего витка – вогнутую сторону этого же зуба. Резцы головки 3 формируют разноимённые поверхности впадины колеса. Поскольку конические производящие поверхности инструментов 3 и 5 конгруэнтны, зона касания поверхностей зубьев шестерни и колеса распространится на всю поверхность зуба, а боковая поверхность зуба шестерни является огибающей боковой поверхности зуба колеса. При описании параметров этой поверхности в индексы обозначений введём букву τ . Используя метод преобразования координат и перейдя от системы координат инструмента $S_{2\tau}$ к системе координат $S_{1\tau}$ заготовки, получим зависимости, определяющие координаты точек теоретического профиля зуба шестерни в различных торцовых сечениях в системе $S_{1\tau}$,

$$\left. \begin{aligned} x_{1\tau} &= (x_{2\tau} + x_{O_{w1\tau}}) \cos \Phi_{1\tau} + (y_{2\tau} + r_{a1}) \sin \Phi_{1\tau} - \Delta x_{1\tau} \cos \Phi_{1\tau}, \\ y_{1\tau} &= (x_{O_{w1\tau}} - x_{2\tau}) \sin \Phi_{1\tau} + (y_{2\tau} + r_{a1}) \cos \Phi_{1\tau} + \Delta x_{1\tau} \sin \Phi_{1\tau}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где $x_{2\tau}, y_{2\tau}$ – координаты точек торцового профиля зуба производящей рейки при условии, что $z_{2\tau} = z_{1\tau}$; $x_{O_{w1\tau}} = -(R_{02} + 0,5S_{w02})$ – координата оси шестерни в момент формообразования поверхности зуба в окрестности точки $E_{w1\tau}$;

$\Phi_{1\tau} = \frac{\Delta x_{1\tau}}{r_{w1}}$; $\Delta x_{1\tau}$ – длина пути обката заготовки по производящей рейке.

Поскольку в точках линии уровня приведённый зазор Δ_n имеет постоянное значение, для определения границы зоны касания в различных торцовых сечениях зубьев были рассчитаны расстояния по нормали между модифицированным и теоретическим профилями зубьев шестерни и зафиксированы координаты точек, в которых это расстояние имеет одинаковое значение и соответствует условию (1). В каждом торцовом сечении в пределах зоны касания таких точек будет две или одна (на краях зоны касания). В совокупности эти точки и определяют границу зоны касания зубьев.

Уравнение нормали к модифицированному профилю выпуклой стороны зуба шестерни в среднем сечении (рис. 5) $\frac{\partial x_1}{\partial y_2} (X - x_1) + \frac{\partial y_1}{\partial y_2} (Y - y_1) = 0$,

где X, Y – координаты текущей точки нормали $n - n$. После определения частных производных и преобразования уравнение примет вид

$$(tg\alpha_2 \cos \Psi_1 + \sin \Psi_1)(X - x_1) + (-tg\alpha_1 \sin \Psi_1 + \cos \Psi_1)(Y - y_1) = 0. \quad (6)$$

Аналогично, с использованием зависимостей (3) и (4) находится уравнение нормали к модифицированному профилю выпуклой стороны зуба шестерни в торцовом сечении

$$\left(\frac{z_2}{\sin^2 \theta_2} \cos \Psi_1 + \frac{z_2 \cos \theta_2 \operatorname{ctg} \alpha_2}{\sin^2 \theta_2} \sin \Psi_1\right)(X - x_1) + \left(-\frac{z_2}{\sin^2 \theta_2} \sin \Psi_1 + \frac{z_2 \cos \theta_2 \operatorname{ctg} \alpha_2}{\sin^2 \theta_2} \cos \Psi_1\right)(Y - y_1) = 0.$$

Задаваясь координатами любой точки 1 модифицированного профиля, рассчитаем координату $x_{1\tau 1}$ некоторой точки 2 теоретического профиля зуба из диапазона $x_{1\tau \min} - x_{1\tau \max}$, определяемого уравнениями (5). Приняв координату $x_{1\tau 1}$ в качестве текущего значения координаты X точки 3 нормали $n - n$, по формуле (6) определим ординату Y этой точки. Зная координаты точек 1 и 3, получим уравнение нормали к модифицированному профилю в точке 1. Для вычисления координат $x_{1\tau}, y_{1\tau}$ точки 4 пересечения нормали и теоретического профиля зуба был использован метод дихотомии. Итерационный процесс повторяют для N – множества точек модифицированного профиля зуба шестерни и определяют текущие значения приведённого зазора в этих точках

$$\Delta_i = \sqrt{(x_{1\tau} - x_1)^2 + (y_{1\tau} - y_1)^2}.$$

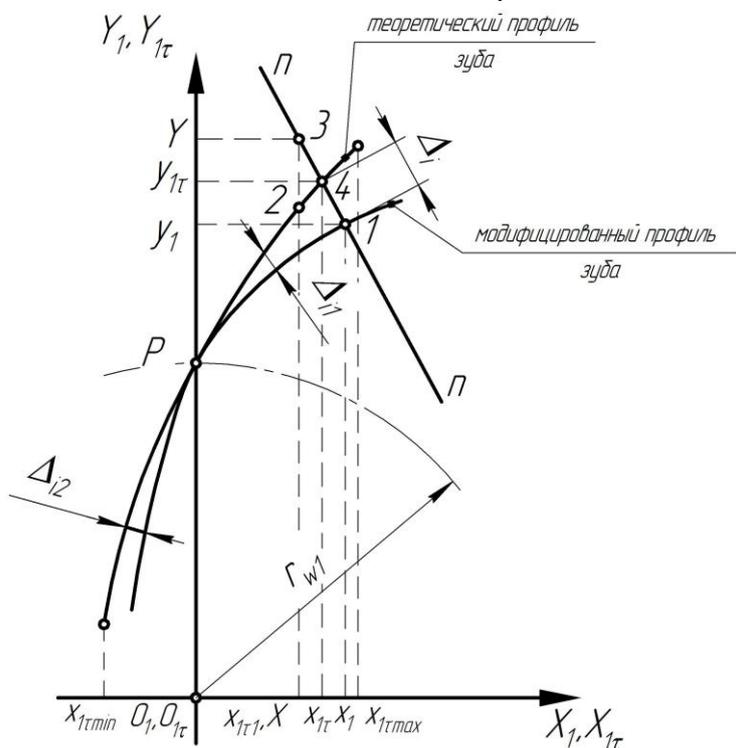


Рис. 5 – Схема к расчёту приведённого зазора

Полученные значения Δ_i сравнивают с расчётным значением Δ_n приведённого зазора и выбирают два из них Δ_{i1} и Δ_{i2} , расположенные выше и ниже начальной окружности и удовлетворяющие условию (1).

Продольная локализация зоны касания обеспечивается путём отдельной чистовой обработки выпуклых и вогнутых сторон зубьев шестерни 1 односторонними головками 2 и 3 (рис.6), образующие радиусы R_{w2} и R_{we2} которых соответственно меньше и больше обра-

зующих радиусов $R_{w2\tau}$ и $R_{we2\tau}$ двухвитковой головки 5 для формирования шестерни с теоретическими боковыми поверхностями зубьев. Радиусы R_{w2} и

R_{we2} инструментов рассчитывают, задаваясь предварительно в соответствии с параметрами передачи номинальным радиусом R_{02} двусторонней головки для обработки зубьев колеса, значением приведённого зазора Δ_n и длиной зоны касания зубьев. Требуемая длина зоны касания устанавливалась с помощью коэффициента k . Например, если длина должна составлять 60% от ширины b зубчатого венца, то коэффициент $k = 0,3$, а крайней точкой линии

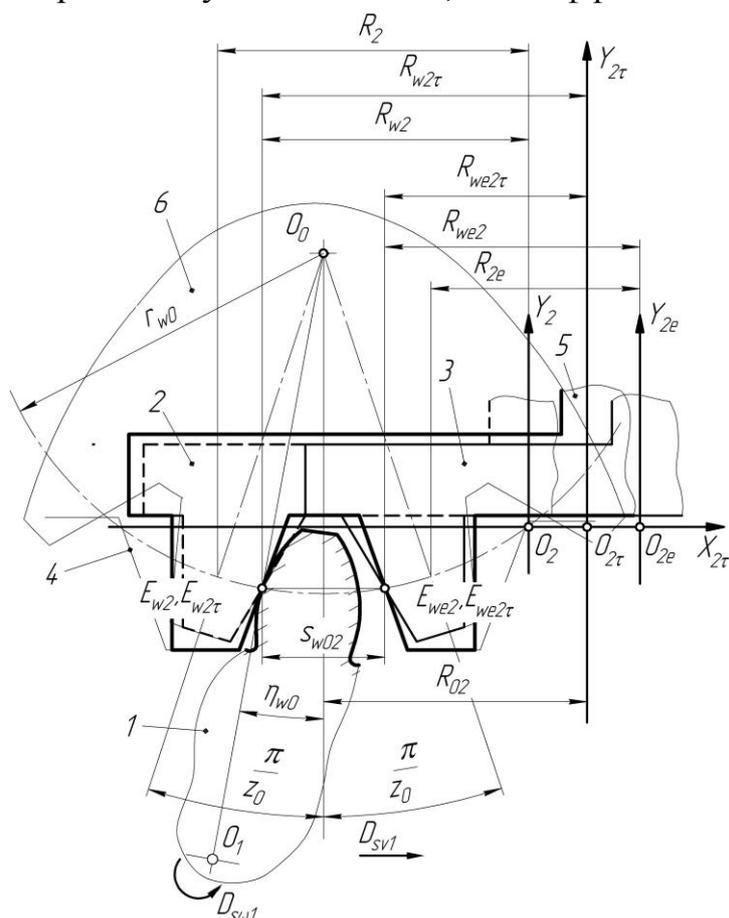


Рис. 6 – Схема к расчёту радиусов чистовых резцовых головок для обработки зубьев шестерни

Кроме того, в главе приведены зависимости для определения предельных значений углов θ_2 и $\theta_{2\tau}$, и изложена методика расчёта координат точек переходной поверхности зуба шестерни, определяющей геометрию вершины резца инструмента.

Третья глава посвящена созданию программного комплекса для компьютерного моделирования станочных и рабочего зацеплений цилиндрических колёс с круговыми зубьями в системе Компас-3D. Комплекс представлен в трёх приложениях к диссертации и позволяет:

- выполнять расчёты геометрических параметров станочных зацеплений шестерни с модифицированными и немодифицированными зубьями;
- определять геометрические параметры рабочего зацепления;
- рассчитать наладочные параметры зубообрабатывающих станков и параметры ЗГ;

уровня, в которой выполняется условие (1), будет точка, удалённая на расстояние $0,3b$ от среднего сечения шестерни. Для этого торцового сечения справедливы выражения

$$R_{w2} = 0,5 \left[C_1 + \frac{(kb)^2}{C_1} \right],$$

$$R_{we2} = 0,5 \left[C_2 + \frac{(kb)^2}{C_2} \right],$$

где

$$C_1 = R_{w2\tau} - \sqrt{R_{w2\tau}^2 - (kb)^2} + \Delta_n;$$

$$C_2 = R_{we2\tau} - \sqrt{R_{we2\tau}^2 - (kb)^2} - \Delta_n;$$

$$R_{w2\tau} = R_{02} + 0,5S_{w02}.$$

Номинальные радиусы чистовых односторонних ЗГ

$$R_2 = R_{w2} - r_{w0} \left(\sin \eta_{w0} - \sin \frac{\pi}{z_0} \right),$$

$$R_{2e} = R_{we2} + r_{w0} \left(\sin \eta_{w0} - \sin \frac{\pi}{z_0} \right).$$

- создавать исходные данные для визуализации модифицированной и немодифицированной (отсчётной) боковых поверхностей зуба, а также линии уровня приведённых зазоров;

- осуществлять трёхмерное графическое построение модифицированной и отсчётной теоретической поверхностей зуба и границы зоны касания зуба (рис. 7).

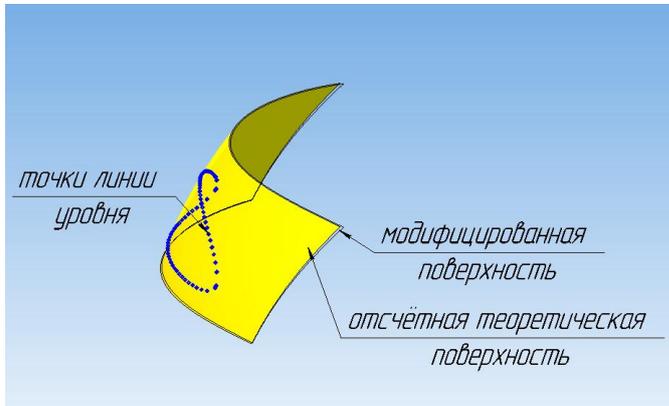


Рис. 7 – Результат графического моделирования модифицированной и отсчётной теоретической поверхностей зуба шестерни и границы зоны касания зуба



Рис. 8 – Обработка модифицированных зубьев шестерни на четырёхкоординатном станке ОЦ-1И22

Для подтверждения соответствия разработанной модели моделируемому объекту на четырёхкоординатном станке ОЦ-1И22 было проведено опытное нарезание круговых зубьев партии колёс (рис. 8). Контроль точности зубчатых колёс осуществлялся по трём показателям в среднем сечении колёс: радиальное биение зубчатого венца, отклонение и накопленная погрешность шага находились в пределах 7-8 степеней точности по ГОСТ 1643-81. Расположение, форма и размеры пятна контакта зубьев проверялись по краске на контрольно-обкатном станке при лёгком торможении. Оно занимало середину зуба и не выходило на торцы колеса, соответствуя расположению, форме и размерам расчётной зоны касания зуба, что подтверждает правильность методики, изложенной во второй главе диссертации. В результате визуального осмотра зубьев и стандартных вычислений относительные размеры пятна контакта зубьев всей партии колёс оказались в пределах от 50 до 65% и от 40 до 50% соответственно от длины и высоты зуба, что также отвечает 7-8 степеням точности.

В четвёртой главе обоснован выбор конструкции ЗГ и изложены зависимости по расчёту геометрических параметров инструмента и наладок зубообрабатывающих станков. Поскольку замена стандартного инструмента ЗГ с незатылованными резцами создаёт предпосылки для повышения производительности и стойкости головок и упрощает процесс изготовления и заточки резцов, было принято решение использовать нестандартный инструмент с незатылованными резцами. Заточка таких резцов осуществляется по задним поверхностям на плоскошлифовальном станке. Расчёт геометрии инструмента, его режущей части выполняется по приведённой методике.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе теоретически и экспериментально обоснованы технология формообразования круговых зубьев пары цилиндрических колёс и синтез параметров станочных зацеплений, обеспечивающие локализацию контакта в рабочем зацеплении с достижением требуемых размеров, формы и расположения зоны касания зуба. В процессе выполнения работы были получены следующие основные результаты и сделаны выводы.

1 В результате анализа ряда работ отечественных и зарубежных учёных установлено, что применение цилиндрических передач с арочными зубьями взамен передач традиционных видов позволяет в ряде случаев существенно улучшить их эксплуатационные характеристики за счёт снижения шума и вибрации, повышения плавности работы и нагрузочной способности передачи, а одним из эффективных способов повышения изгибной и контактной прочности зубьев тяжело нагруженных и высокоскоростных зубчатых передач является совокупная профильная и продольная модификация зубьев, устраняющая опасность кромочного контакта в реальных условиях зацепления.

2 Разработан новый способ обработки круговых зубьев пары цилиндрических колёс, обеспечивающий требуемую локализацию зоны касания зуба по его длине и высоте без применения инструмента с нестандартным производящим контуром, отличным от трапецеидального.

3 Для проектирования зуборезного инструмента и наладок зубообрабатывающих станков определены геометрические параметры станочных и рабочего зацеплений в среднем сечении.

4 На основе геометрического и кинематического анализа станочного зацепления шестерни с производящим колесом разработано математическое обеспечение процесса формообразования модифицированных зубьев и установлены зависимости для расчёта геометрических параметров выпуклой и вогнутой боковых поверхностей зуба, в частности координат точек этих поверхностей, используемых при определении границы зоны касания зуба.

5 По результатам анализа станочного зацепления шестерни с производящей рейкой получены зависимости, описывающие геометрические характеристики отсчётных теоретических поверхностей зуба шестерни и служащие для расчёта приведённых зазоров и координат точек линий уровня приведённых зазоров. Разработанная методика расчёта координат точек линий уровня позволяет определять границы зон касания выпуклой и вогнутой сторон зуба.

6 На основе разработанных способа формообразования круговых зубьев пары цилиндрических колёс и методик определения параметров станочных и рабочего зацеплений создан программный комплекс, позволяющий синтезировать параметры станочных зацеплений, наладок зубообрабатывающих станков и зуборезных инструментов, обеспечивающие требуемые размеры и расположение зоны касания зубьев в передаче.

7 Разработанная компьютерная модель станочных и рабочего зацеплений позволяет на стадии подготовки производства определять границу зоны

касания зуба и корректировать при необходимости размеры, форму и расположение зоны касания за счёт изменения параметров наладки станка и инструмента.

8 На базе полученных зависимостей по расчёту геометрических параметров зуборезных головок для черновой и чистовой обработки зубьев спроектирован и изготовлен инструмент с незатылованными резцами. Замена стандартного инструмента головками предлагаемой конструкции упрощает его изготовление и заточку и создаёт предпосылки для повышения производительности и стойкости инструмента.

9 Созданные методика определения параметров станочных и рабочего зацеплений пары цилиндрических колёс, наладок зубообрабатывающих станков и инструментов, а также программное обеспечение для моделирования процессов зацеплений проверены на практике. Изготовленные колёса контролировались в среднем сечении. Их точность по трём показателям находилась в пределах 7-8 степеней по ГОСТ 1643-81. Пятно контакта контролировалось в соответствии с ГОСТ 1643-81 на контрольно-обкатном станке. Оно занимало середину зуба и не выходило на его кромки, располагаясь в границах расчётной зоны касания. Относительные размеры пятна контакта по длине и высоте зуба также отвечали 7-8 степеням точности стандарта. Таким образом, экспериментальная проверка подтвердила соответствие модели моделируемому объекту.

10 Результаты проведённого исследования использованы в промышленности и учебном процессе.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1 Бочкова Д.Е. Расчёт ограничений размеров сечения венцовой части заготовки конического колеса передачи смешанного зацепления // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. С. 79-84.

2 Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Способы обработки цилиндрических зубчатых колёс с модифицированными зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 6. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2011. С. 245-249.

3 Д.Е. Бочкова, Г.М. Шейнин, М.Н. Бобков. Расчет координат точек модифицированного профиля зуба цилиндрического колеса // «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии». № 2 - 4 (292). Орёл, 2012. С. 84-88.

4 Д.Е. Бочкова. Преобразование систем координат при расчёте геометрических параметров цилиндрического колеса с круговыми зубьями // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 52-57.

5 Д.Е. Бочкова. Определение границы зоны касания кругового зуба шестерни цилиндрической передачи // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 8. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 127-132.

6 Пат. 2510789 Российская Федерация, МПК В23F9/02, В23F9/08. Способ обработки пары цилиндрических зубчатых колёс / Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М., Маликов А.А.; заявитель и патентообладатель Тульский гос. ун-т. № 2012136485/02; заявл. 24.08.12; опубл. 10.04.14, Бюл. № 10. 5 с.: ил.

7 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018614487. Программа расчёта координат точек линии уровня боковой поверхности модифицированного кругового зуба шестерни цилиндрической передачи / Бочкова Д.Е., Бобков М.Н.; правообладатель Тульский гос. ун-т. № 2017664007; дата поступления 29.12.17; дата гос. регистрации 6.04.18.

8 Бобков М.Н., Бочкова Д.Е. Способ модификации зубьев цилиндрических зубчатых колёс // Инструмент и технологии. № 35. Выпуск 1. 2012. С. 15-19.

9 Бочкова Д.Е. Определение координат точек модифицированного профиля зуба цилиндрического колеса // Молодёжный вестник политехнического института: сборник статей. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 106-107.

10 Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Способ обработки пары цилиндрических зубчатых колёс с модифицированными зубьями // Молодёжный вестник политехнического института: сборник статей. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С. 108-109.

11 Бочкова Д.Е. Геометрический расчёт модифицированного профиля зуба цилиндрического колеса // Сборник тезисов и аннотаций научных докладов XV международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы техники и технологии – ТЕХНОЛОГИЯ – 2012». Орёл: Издательский дом «Спектр», 2012. С. 302-304.

12 Бочкова Д.Е., Бобков М.Н., Шейнин Г.М. Формообразование круговых зубьев цилиндрических колёс с продольной и профильной модификацией // Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии». Ч. 1. Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012. С. 311-313.

13 Бочкова Д.Е., Бобков М.Н. Расчёт параметров станочного зацепления при формообразовании круговых зубьев шестерни цилиндрической передачи // Сборник докладов VIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 23-26 сентября 2015 г. С. 36-42.

14 Бочкова Д.Е. Расчет координат точек переходной кривой при формообразовании круговых зубьев колеса цилиндрической передачи // Сборник докладов IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 5-8 октября 2016 г. С. 75-79.

Подписано в печать 29.01.2019 г.

Формат бумаги 70x100/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ 024А.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95.