

*На правах рукописи*



**ЖУРИНА АНАСТАСИЯ СЕРГЕЕВНА**

**ФИНИШНАЯ ОБРАБОТКА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС  
ИНСТРУМЕНТАМИ С ИСКУССТВЕННЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ  
РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗУБЬЕВ И КОМБИНИРОВАННЫМ  
СМЕЩЕНИЕМ ПРОИЗВОДЯЩЕГО КОНТУРА**

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

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тула 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Валиков Евгений Николаевич

Официальные оппоненты: Хандожко Александр Владимирович,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет», заведующий  
кафедрой «Металлорежущие станки и  
инструменты»

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 «Орловский государственный  
университет имени И.С. Тургенева»

Защита диссертации состоится «05 » июня 2018 г. в 14.00 часов на  
заседании диссертационного совета Д 212.271.01 созданного на базе  
ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу:  
300012, г. Тула, проспект Ленина, 92 (9-101)

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

Автореферат разослан «06» апреля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие машиностроения в условиях функционирования современной рыночной экономики предъявляет все более высокие требования к качеству и точности выпускаемой продукции, от чего в значительной степени зависит ее конкурентная способность. Качество и точность продукции машиностроения определяются рядом факторов, причем одними из основных факторов являются технология производства и прогрессивность применяемого металлообрабатывающего инструмента.

Особое место среди машиностроительной продукции занимают различные детали с периодическими профилями. Зубчатые передачи – наиболее распространенный тип механических передач, используемых в машинах и приборах для преобразования вращательного движения. Эвольвентное зацепление, получившее широкое применение в современных зубчатых передачах, всесторонне изучено теоретически и хорошо освоено технологически.

При использовании простого по форме производящего контура (ПРК) при обработке зубчатых колес методом обкатки последний в некоторых пределах можно смещать радиально относительно нарезаемой заготовки. Такое смещение получило достаточно глубокое теоретическое обоснование и нашло практическое применение при разработке новых способов чистовой обработки зубчатых деталей. Предлагаемый способ основывается на использовании в качестве вектора скорости резания скольжение контактной точки по профилю, а резание производится микрорельефом поверхности инструмента.

Однако, несмотря на значительное количество работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных исследованиям финишных способов обработки зубчатых колес, вопросы теории и методы проектирования инструментов разработаны недостаточно, что ограничивает потенциальные возможности производства с точки зрения повышения качества, производительности обработки, а также решений иных технологических задач зубообработки.

Из вышеизложенного можно считать, что разработка и исследование способа финишной обработки зубчатых колес инструментами с искусственным микрорельефом режущей части рабочих поверхностей зубьев, являются весьма актуальными.

**Цель работы.** Заключается в повышении качества зубчатых колес путем разработки и теоретического обоснования способа финишной обработки инструментами с искусственными микрорельефами режущей поверхности при комбинированном смещении производящего контура.

Поставленная цель определяет следующие основные **задачи исследования:**

1 Выполнить теоретическое и экспериментальное исследования процесса финишной обработки зубчатых колес с использованием режущих свойств инструмента с искусственным микрорельефом рабочей поверхности.

2 Разработать на основе существующей теории эвольвентного зацепления систему геометрического расчета зубчатой передачи, обеспечивающую безусловный выход полюса за пределы рабочей высоты зуба.

3 Определить влияние коэффициентов радиального и тангенциального смещения ПРК на качественные показатели зубчатого зацепления и установить рациональные диапазоны их варьирования.

4 Разработать методику расчета геометрических параметров зубообрабатывающего инструмента с комбинированным смещением исходного контура.

5 Разработать экспериментальные конструкции инструментов с микро-рельефами режущих рабочих поверхностей.

6 Произвести технологические исследования зубчатых колес, обработанных режущими инструментами с искусственным рельефом рабочих поверхностей зубьев.

7 Использовать результаты исследований для создания оборудования финишной обработки зубчатых колес.

**Объект исследования.** Процессы механической обработки цилиндрических зубчатых колес.

**Предмет исследования.** Операция финишной обработки цилиндрических зубчатых колес инструментами с искусственными микро-рельефами поверхностей зубьев.

**Методы исследования.** В работе использован комплексный метод исследований, включающий теоретический анализ и экспериментальную проверку полученных результатов в лабораторных условиях. В теоретических исследованиях использовались методы теории эвольвентных зубчатых зацеплений, теории формообразования производящих поверхностей режущих инструментов для обработки зубчатых деталей, методов математического и компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с использованием современных испытательных машин и регистрирующей аппаратуры: прибор для проверки изделий на биение в центрах модели ПБ-1600; прибор для проверки зубчатых колес К. ЦЕЙСС; прибор для контроля шероховатости и контура поверхности HOMMEL-ETAMIC T8000/C8000, эвольвентомер VG 450, электронный микроскоп Saike Digital SK2700P, цифровой инструментальный микроскоп Levenhuk DTX 500 LCD.

**Автор защищает:**

1 Способ финишной обработки зубчатых деталей инструментами с искусственным микро-рельефом рабочих поверхностей зубьев, образованных электроэрозионным методом.

2 Теоретическое исследование процесса финишной обработки эвольвентных зубчатых деталей внешнего зацепления инструментами с искусственным микро-рельефом поверхности, образованной электроэрозионным методом.

3 Методику расчета инструментов для обработки зубчатых деталей внешнего зацепления с комбинированным смещением исходного контура.

4 Новые конструкции инструментов для финишной обработки зубчатых деталей.

5 Результаты экспериментального исследования точности финишной обработки цилиндрических зубчатых колес инструментами внеполюсного зацепления, рабочие поверхности которых выполнены электроэрозионным методом.

**Научная новизна** заключается в теоретическом обосновании условий осуществления технологии финишной зубообработки режущими инструментами (трехмерными, линейчатыми и рельефами) с искусственными микрорельефами рабочих поверхностей зубьев при комбинированном смещении производящего контура инструмента, а также экспериментальном обосновании длительности и чередовании циклов, частоты вращения, подачи.

**Практическая значимость.** Разработаны методики расчета основных параметров внеполюсного зацепления зубчатой пары «инструмент – обрабатываемое колесо» и конструктивных параметров специальных режущих инструментов с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев, установлены диапазоны режимов обработки, обеспечивающих высокое функциональное качество обработанной поверхности и заданную точность изготовления, определена область эффективного применения инструментов с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев.

**Реализация работы.** Результаты приняты к внедрению ООО «Морена». Материалы диссертации используются в учебном процессе при изложении дисциплины «Технология инструментального производства», при курсовом и дипломном проектировании, выполнении квалификационных работ бакалавров, магистерских диссертаций по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительного производства».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава кафедры «Инструментальные и метрологические системы» Тульского государственного университета, представлены в 17-м Московском международном Салоне изобретений инновационных технологий «Архимед-2014» в Конгрессно-выставочном центре «Сокольники», на Всероссийской научно-технической конференции «Высокие, критические электро- и нанотехнологии» 19 декабря 2017 г., а также на заседании технической секции производственно-технического Совета АО «АК «Туламашзавод» протокол № 55 от 07.12.2017 г.

**Публикации.** Материалы проведенных исследований отражены в 4 статьях рецензируемых изданий, внесенных в список ВАК; 2 тезиса докладов на региональной и всероссийской научно-технических конференциях, 3-х патентах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 76 наименований, 13 приложений, содержит 97 рисунков, 5 таблиц. Общий объем – 222 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснованы выбор темы, её актуальность, дана краткая характеристика направления исследования, определено научное и практическое значение работы.

В **первом** разделе приведен анализ существующих методов финишной обработки цилиндрических зубчатых колес. Разработана классификация способов

финишной обработки, основанная на конструктивно-технологических признаках. Методы финишной обработки по характеру воздействия инструмента на материал заготовки можно разделить на четыре метода: лезвийную обработку, абразивную обработку, поверхностное пластическое деформирование (ППД) и комбинированные методы обработки.

Рассмотренные методы обработки, имеют свои технологические особенности, что позволяет выделить наиболее характерные, главные технологические особенности каждого из них, осуществить сравнение их характеристик по основным качественным показателям обрабатываемых зубчатых колес и, в конечном счете, обеспечивает выбор оптимальных вариантов обработки для достижения заданной точности геометрических параметров при высокой их производительности и низкой трудоемкости.

Проведенный анализ методов финишной обработки зубчатых колес различными инструментами показал, что у них имеются определенные ограничения, связанные либо со сложностью конструкции инструмента и соответственно высокой его стоимостью, либо с ограниченной областью применения, либо с необходимостью использования специального оборудования со сложной кинематикой. Наиболее простым финишным методом обработки зубчатых колес является обработка «шарошкой», однако недостатком этого метода в течение длительного времени являлась сложность изготовления инструмента необходимой точности. В настоящее время, с появлением высокоточных электроэрозионных станков для проволоочной вырезки зубчатого профиля, могут быть изготовлены инструменты, при этом на рабочей поверхности зубьев формируется искусственный микрорельеф, обладающий высокими режущими свойствами.

На основе вышеизложенного сделан вывод о необходимости теоретических и экспериментальных исследований процесса резания, разработки методик расчета и конструирования инструмента, оснастки и технологических процессов финишной обработки зубчатых колес с использованием режущих свойств инструмента с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей, формируемых при электроэрозионной обработке.

Также в первом разделе изложены элементы геометрической теории эвольвентного зацепления применительно к задаче разработки предлагаемого способа финишной обработки зубчатых колес.

Зубчатую передачу, изготавливаемую данным способом можно спроектировать так, чтобы полюс находился на активной линии зацепления (полюсные передачи) или за её пределами (внеполюсные передачи). Изменяя положение полюса, можно влиять на величину и направление скорости скольжения. Положение полюса регулируют выбором коэффициента радиального смещения  $\chi$ , производящего контура и системы расчета.

Качественными характеристиками зубчатого колеса и зубчатой передачи являются показатели отсутствия заострения, интерференции и подрезания зубьев, значение коэффициента торцового перекрытия, скорость скольжения и удельные скольжения сопряженных профилей.

Для улучшения отдельных качественных показателей, прочностных характеристик зубчатых колес и передач, реализации способов финишной обработки, основанных на использовании для обеспечения резания скольжения боковых поверхностей зубьев инструмента относительно боковых поверхностей зубьев обрабатываемых зубчатых колес и решения других инженерных задач используется способ корригирования (радиальное смещение ПРК в процессе нарезания зубьев). Теоретические основы и сущность корригирования изложены в ряде работ И.А.Болотовского, Т.П. Болотовской, Я.С. Давыдова, Я.И. Дикера, М.Л. Ерихова, Э.Б. Вулгакова, Э. Вильдгабера и др. В производстве прямозубых конических зубчатых колес используется тангенциальное смещение – изменение расчетных толщин зубьев сопряженных зубчатых колес для выравнивания изгибных и контактных напряжений в зубьях шестерни и зубчатого колеса в передаче.

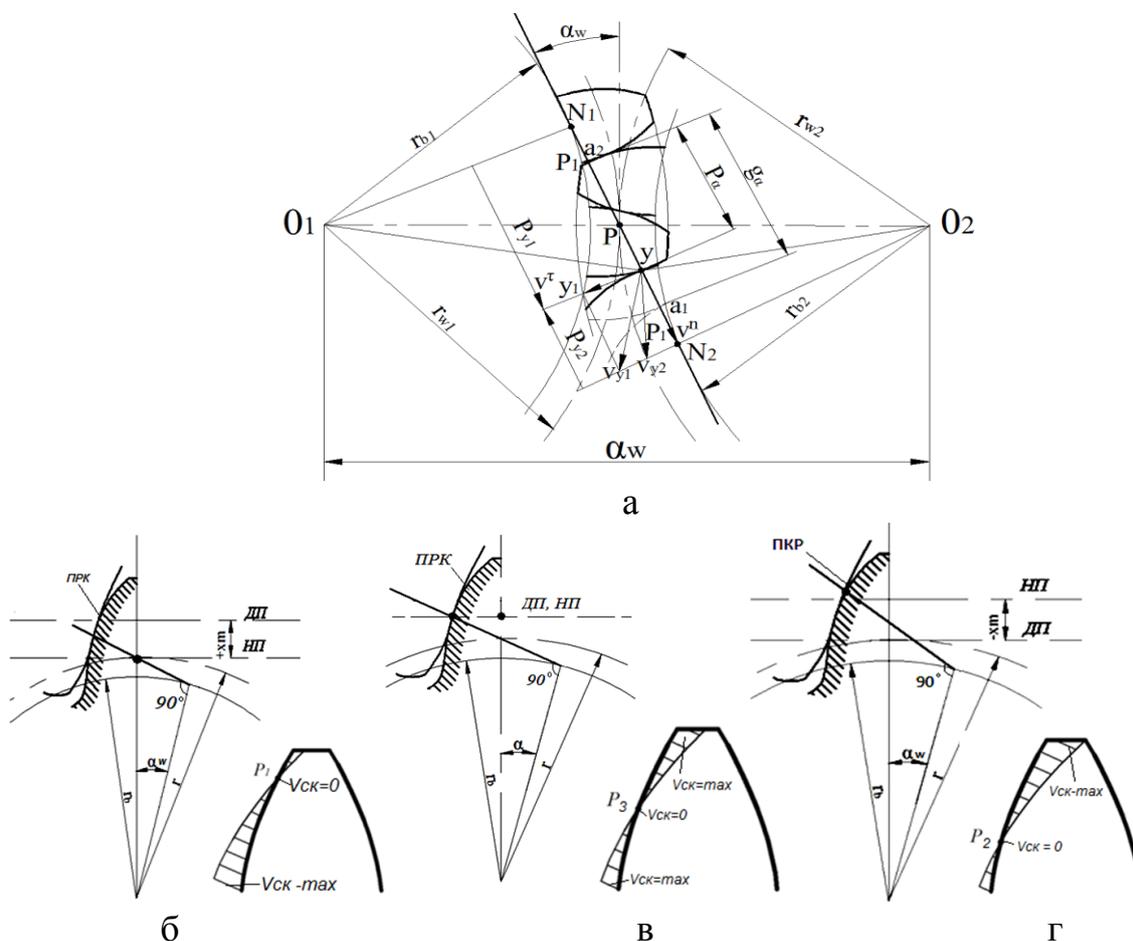


Рисунок 1 – Зубчатое эвольвентное зацепление и положение производящего реечного контура: а – зубчатое эвольвентное зацепление: б – зацепление без смещения; в – зацепление с положительным смещением; г – зацепление с отрицательным смещением

Реализуется этот вид корригирования изменением развода резцов. Для цилиндрических зубчатых колес такое смещение считалось неприемлемым из-за необходимости применять специальный режущий инструмент и теоретически не разрабатывалось ввиду сложности разработки и изготовления специального инструмента. В общем случае можно выполнить зубчатое колесо с комбинирован-

ным смещением, состоящим из суммы радиального и тангенциального смещения. Зубчатое эвольвентное зацепление и положение ПРК при радиальном, тангенциальном и комбинированном смещении представлено на рисунках 1 и 2.

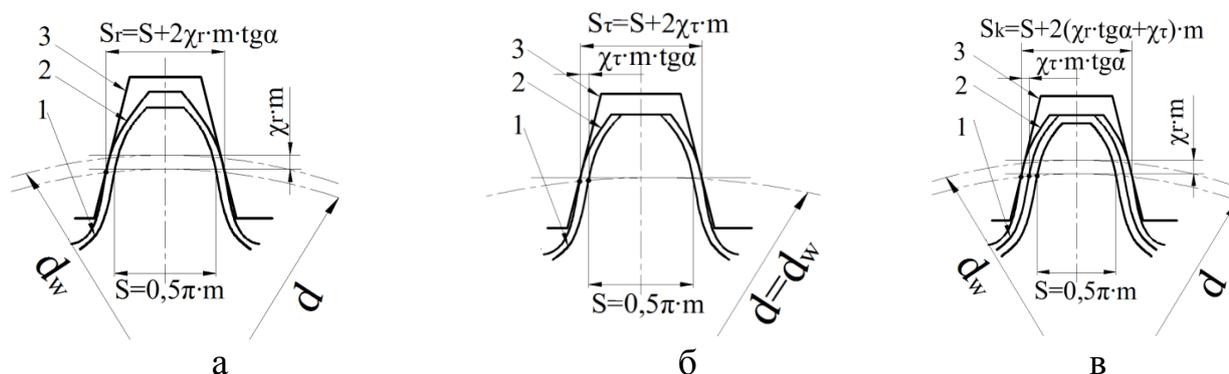


Рисунок 2 – Положение производящего реечного контура: а– при радиальном смещении; б – при тангенциальном смещении; в – при комбинированном смещении; 1 – номинальный профиль; 2– скорректированный профиль; 3 – производящий реечный контур ПРК;  $S$  – номинальная толщина зуба по делительной окружности;  $S_r$  – толщина зуба по делительной окружности при радиальном смещении ПРК;  $S_\tau$  – толщина зуба по делительной окружности при тангенциальном смещении ПРК;  $S_k$  – толщина зуба по делительной окружности при комбинированном смещении ПРК

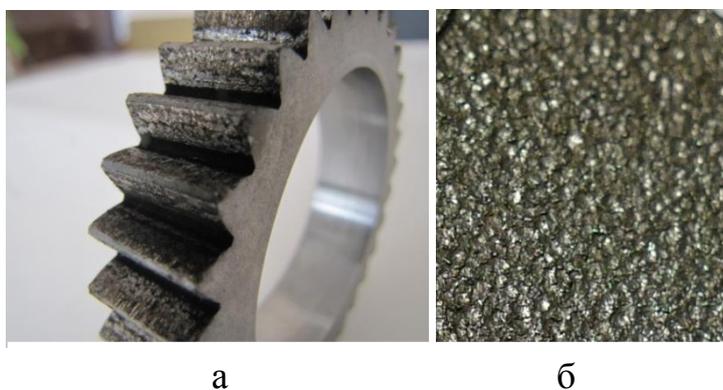


Рисунок 3 – Инструмент с искусственным микрорельефом поверхности (а); режущая поверхность инструмента (масштаб 50:1)

обработки, основанных на использовании в качестве вектора скорости резания скольжение боковых поверхностей зубьев инструмента относительно боковых поверхностей зубьев обрабатываемых колес.

Обеспечить безусловную возможность создания внеполусного зацепления пары «инструмент – обрабатываемое зубчатое колесо» целесообразно с помощью комбинированного (радиального и тангенциального) смещения профилей зубьев, в том числе и при использовании стандартного ПРК.

В работе приведены расчетные зависимости для определения конструктивных размеров цилиндрических зубчатых колес с комбинированным смещением ПРК. Как показали исследования, применяемое в настоящее время скорректирование профилей зубьев цилиндрических зубчатых колес путем радиального смещения ПРК не всегда позволяет создать в зубчатой передаче внеполусное зацепление. В результате затрудняется реализация способов финишной

Во **втором** разделе приведены результаты теоретического исследования процесса резания при финишной обработке зубчатых колес инструментами с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев, полученных электроэрозионной обработкой и комбинированным смещением ПРК. Пример подобного инструмента приведен на рисунке 3а.

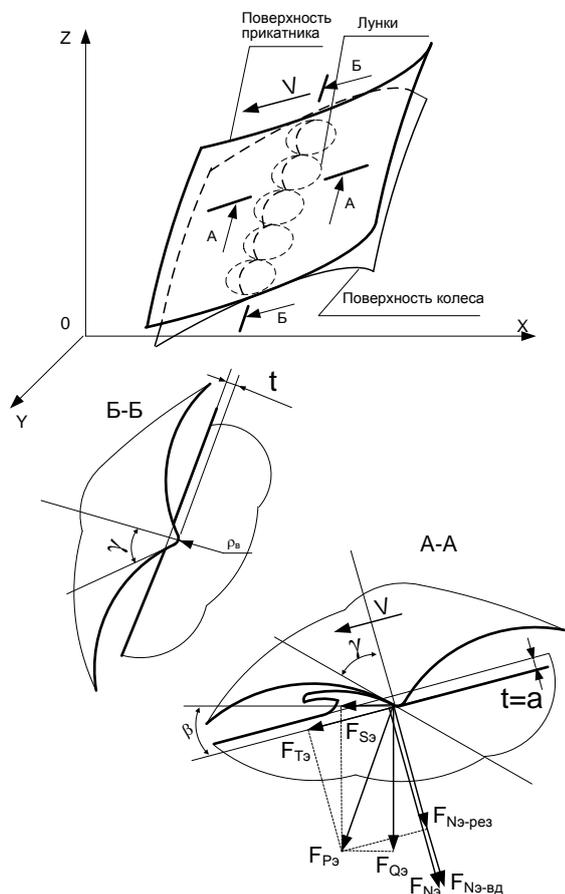


Рисунок 4 – Схема резания элементами с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев после электроэрозионной обработки

После электроэрозионной обработки профиля инструмента на рабочей поверхности остаются лунки, при выбросе металла из которых на их краях образуются кольцевые выступы из упрочненного металла. Эти лунки накладываются друг на друга и формируются остроконечные выступы, которые обладают режущими свойствами. Всё это формирует систему режущих элементов поверхности (рисунке 3 б).

Для этих элементов может быть сформирована схема резания, представленная на рисунке 4. При этом режущие элементы имеют отрицательный передний угол, величина которого оценена на основе геометрических расчетов и экспериментального исследования срезов поверхности и находится в пределах  $50^\circ \dots 60^\circ$ .

Для оценки размеров единичной лунки использованы известные из литературных источников зависимости,

$$D = K_2 \cdot W^{\frac{1}{3}}, \quad h = K_4 \cdot W^{\frac{1}{3}}, \quad h_e = \frac{1}{3} h \quad (1)$$

где  $D$  - диаметр единичной лунки (мкм);  $h$  - глубина единичной лунки (мкм);  $h_e$  - глубина лунок с учетом перекрытия

(высота шероховатости на поверхности после электроэрозионной обработки) (мкм);  $W$  - энергия импульса при электроэрозионной обработке (мкДж);  $K_2$  и  $K_4$  - коэффициенты пропорциональности. Используя эти зависимости, выполнена оценка величины отрицательного переднего угла и других геометрических параметров лунок, в частности их радиуса в плоскости, перпендикулярной режущей поверхности  $R$ , среднего расстояния между центрами лунок  $L$  и площади срезаемого слоя в плоскости, перпендикулярной скорости скольжения (резания)  $S_{cp}(t)$ . Была проведена оценка среднего количества режущих элементов на единице площади рабочей поверхности  $N'_э$ . На рисунке 5 приведены расчет-

ные и экспериментальные значения  $N'_s$ , в зависимости от величины шероховатости  $Rz$  (высоты микронеровностей). Из геометрических соотношений была определена длина дуги площадки контакта колеса и инструмента в зависимости от глубины резания  $l(t)$ , которая позволяет оценить площадь пятна контакта и количество участвующих в резании на этом пятне элементов.

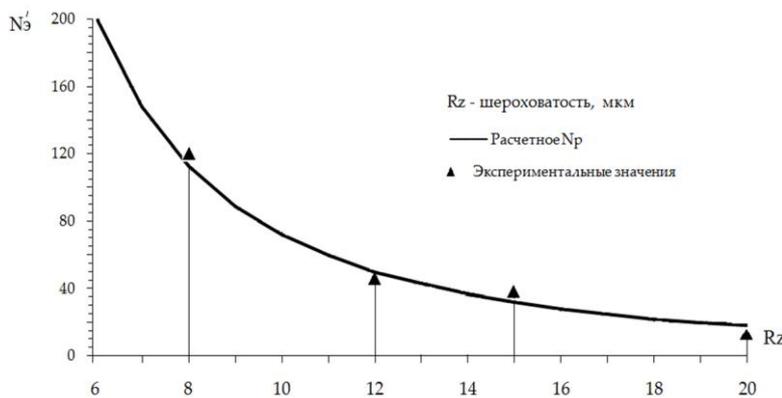


Рисунок 5 – Сравнение теоретических и экспериментальных значений количества режущих элементов на единицу площади поверхности ( $1/\text{мм}^2$ ) инструмента в зависимости от шероховатости микрорельефа

где  $J$  - жесткость технологической системы.

Нормальная к поверхности зуба сила  $F_N$  равно:

$$F_N = \frac{F_p}{2 \cdot \sin \alpha_w}, \quad (4)$$

где  $\alpha_w$  - угол зацепления. Тогда на отдельный режущий элемент будет действовать нормальная составляющая силы поджима инструмента, равная:

$$F_{N_s} = \frac{F_N}{N'_s}. \quad (5)$$

Эта сила обеспечивает нормальную составляющую силы резания и пластическую деформацию (вдавливание) острого режущего элемента инструмента в материал колеса, то есть:

$$F_{N_s} = F_{N_s \text{ рез}} + F_{N_s \text{ вд}}. \quad (6)$$

Отсюда, используя известные в теории резания зависимости и закон Кика, можно записать:

$$\frac{S_{cp}(t) \cdot \tau \cdot (\sin \gamma + \mu \cdot \cos \gamma)}{(\cos \gamma - \mu \cdot \sin \gamma) \cdot \sin \beta} + C \cdot t^2 - \frac{q_p}{2 \cdot \sin \alpha_w \cdot l(t) \cdot N'_s} = 0, \quad (7)$$

где  $\mu$  - коэффициент трения;  $\gamma$  - передний угол;  $\tau$  - предельное напряжение при срезе; где  $\beta$  - угол сдвига;  $C$  - коэффициент, зависящий от твердости поверхностей зуба обрабатываемого колеса, зуба колеса – инструмента и угла при вер-

Радиальная сила поджима инструмента к обрабатываемому колесу  $F_p$  и соответствующая удельная нагрузка, приходящаяся на единицу ширины зуба колеса  $q_p$ , определяются величиной натяга, формируемого в результате радиальной подачи на один цикл врезания (проход)  $\Delta S$ :

$$F_p = \Delta S \cdot J, \quad (2)$$

$$q_p = \frac{F_p}{b}, \quad (3)$$

шине элемента (при этом режущий элемент поверхности рассматривался как индентор с углом при вершине  $2 \cdot \gamma$ ).

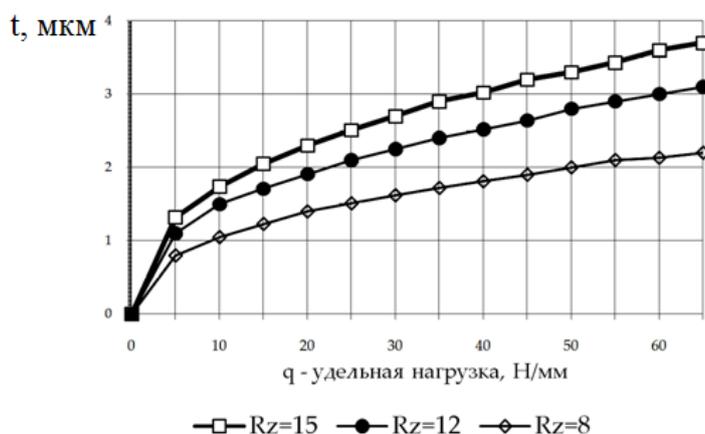


Рисунок 6 – Влияние удельной нагрузки на глубину срезаемого слоя  $t$ :

$z_k$  - число зубьев колеса ( $z_k = 11$ ),

$z_{ин}$  - число зубьев инструмента,

( $z_{ин} = 31$ ),  $m$  - модуль ( $m = 2$  мм)

Численное решение уравнения позволило получить зависимости, связывающие толщину срезаемого слоя и радиальную удельную нагрузку (рисунок 6), которые можно использовать как номограммы для выбора требуемого усилия поджима, формируемого за счет радиальной подачи и упругого натяга, а также для оценки требуемого количества оборотов инструмента для снятия заданного припуска.

При выборе силы поджима и подачи на каждый проход необходимо также учитывать, что максимально допустимая сила  $F_N$  и соответственно,  $F_p$  не должны превышать

предельных значений для прочности зубьев на изгиб. Требуемое количество оборотов инструмента для удаления всего припуска  $\delta$  определяется как

$$n_{np} = \frac{\delta \cdot z_k}{t \cdot z_{ин}} \quad (8)$$

На основе анализа процесса резания зубчатых колес искусственным микро-рельефом рабочих поверхностей зубьев инструмента для его интенсификации предложено использовать инструменты с пазами, параллельными оси зубьев. При этом облегчается отвод стружки, а передние углы режущих элементов на кромке паза становятся менее отрицательными и могут быть даже положительными. С целью повышения стойкости инструмента и производительности предложено также использовать электроискровое легирование рабочих поверхностей инструмента твердосплавными электродами, что также способствовало увеличению передних углов режущих элементов.

В третьем разделе разработан алгоритм расчета и проектирования основных параметров инструментов внеполюсного зацепления для обработки цилиндрических зубчатых колес.

Приведены алгоритм расчета инструмента предполюсного зацепления, методика и программное обеспечение инструмента с радиальным смещением исходного контура, представлены результаты расчета инструментов с радиальным смещением производящего контура для обработки некорректированных зубчатых колес с числом зубьев от 12 до 100 (рисунок 7), а также зависимость коэффициента смещения от числа зубьев инструмента (рисунок 8).

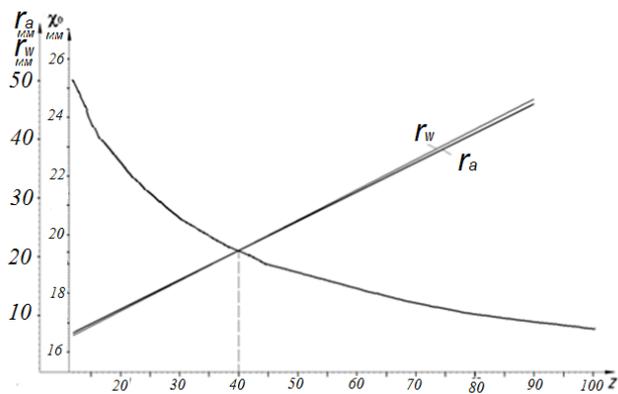


Рисунок 7 – Зависимости коэффициента смещения производящего контура инструмента от числа зубьев обрабатываемого колеса

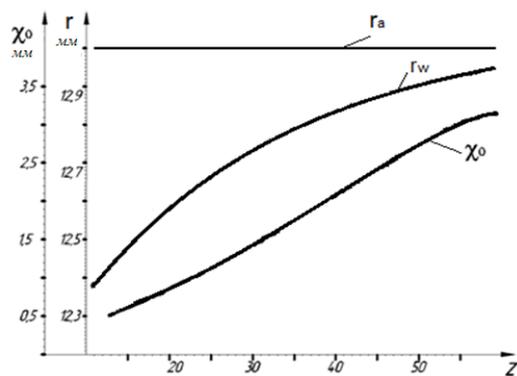


Рисунок 8 – Зависимости коэффициента смещения от числа зубьев инструмента при обработке зубчатого колеса с числом зубьев 24

Установлено, что предположное зацепление при радиальном смещении производящего контура для некоррегированных зубчатых колес возможно при числе зубьев обрабатываемого колеса более 40, а число зубьев инструмента незначительно влияет на положение полюса зацепления.

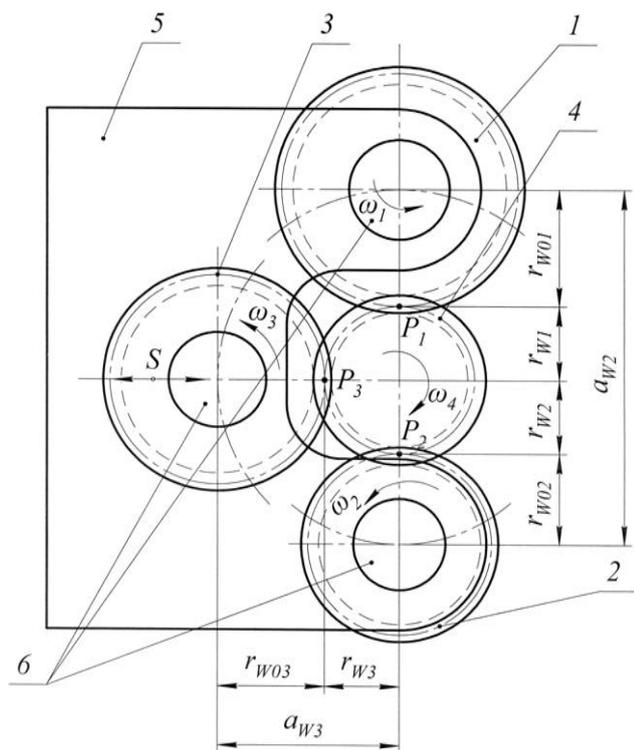


Рисунок 9 – Технологическая схема обработки зубчатых колес тремя роликами

инструментом с числом зубьев  $z_0 = 31$ .

Разработаны новые технологические схемы обработки включающие: способ обработки тремя роликами, позволяющий компенсировать влияние перепада скоростей по высоте зуба на точность обработки (рисунок 9); конструкцию инструмента с продольными канавками на боковых поверхностях зубьев, позволяющего снимать большие припуски (рисунок 10); методику расчета и проектирования инструментов с комбинированным смещением производящего контура (рисунок 11).

В четвертом разделе приведены результаты экспериментального исследования финишной обработки цилиндрических зубчатых колес инструментом, рабочие поверхности зубьев которых имеют искусственный микрорельеф и выполнены электроэрозионным методом. Обработана партия из 50 прямозубых цилиндрических колес с модулем  $m = 2$  мм, числом зубьев  $z = 16$  и

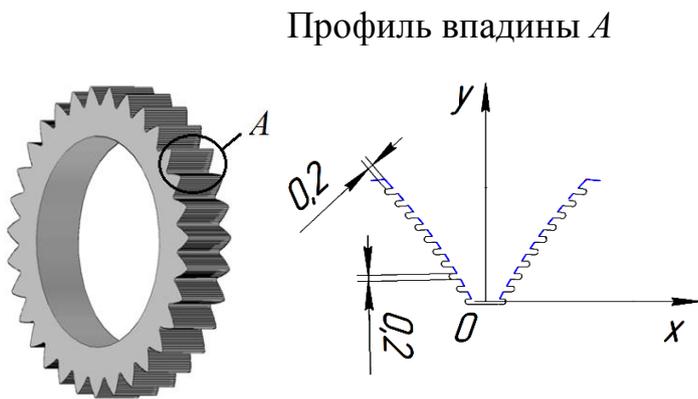


Рисунок 10 – Инструмент с продольными канавками

диальной подачей 0,03..0,05 мм.

На рисунках 12, 13, 14 представлены

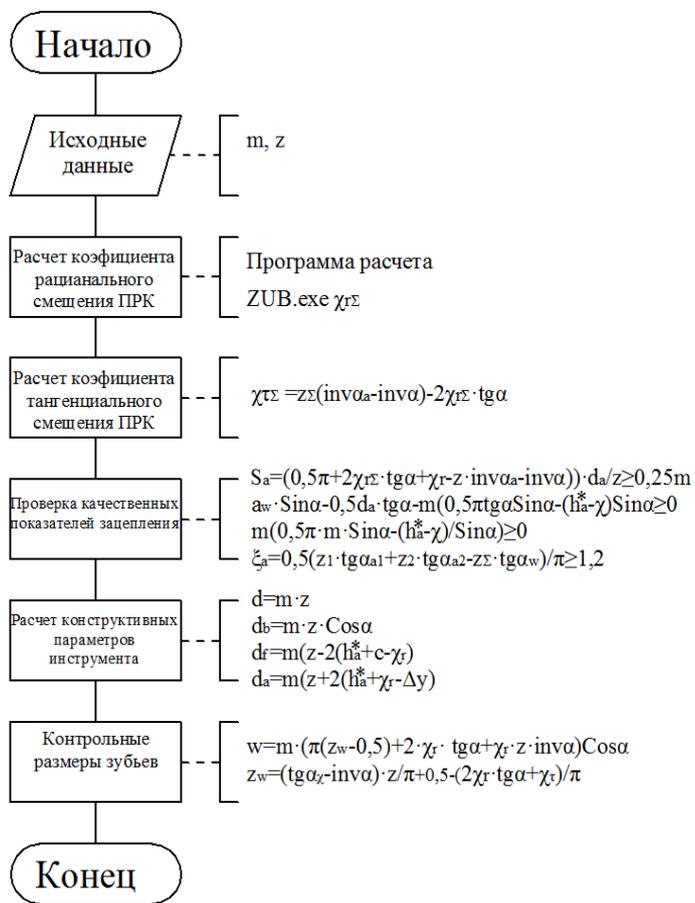


Рисунок 11 – Укрупненный алгоритм расчета инструмента с комбинированным смещением

работки инструментом с микрорельефом рабочих поверхностей зубьев производилось на стационарном приборе для измерения шероховатости HOMMEL-ETAMIC T8000/C8000.

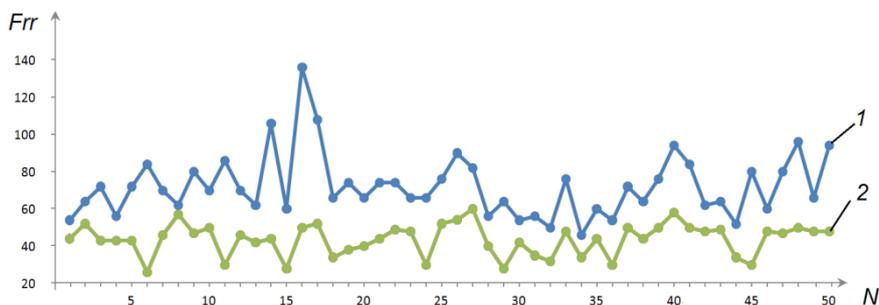
Предварительная обработка зубьев производилась на зуборезном станке, финишная обработка на токарном станке по схеме с приводной заготовкой.

Инструмент устанавливается в устройстве, закрепленном в резцедержателе станка на валу, строго параллельно оси вращения шпинделя. Обработка производилась при реверсивном вращении заготовки с интервалами до 10 с и радиальной подачей 0,03..0,05 мм.

в качестве примера точечные диаграммы (рисунок 12), кривые распределения (рисунок 13) и график линейной корреляционной зависимости (рисунок 14) между радиальным биением после зубофрезерования и радиальным биением после финишной обработки.

Результаты экспериментальных исследований показали отсутствие корреляционной связи между радиальным биением после зубофрезерования и после финишной обработки предложенным инструментом, что свидетельствует о наличии исправляющих способностей финишной обработки цилиндрических зубчатых колес инструментом с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев, выполненным электроэрозионным методом.

Исследование шероховатости поверхности зубьев после зубофрезерования и финишной обработки инструментом с микрорельефом рабочих поверхностей зубьев производилось на стационарном приборе для измерения шероховатости HOMMEL-ETAMIC T8000/C8000.



При исходной шероховатости  $Ra = 4,8$  мкм, шероховатость поверхности после финишной обработки колес составляла  $Ra = 1,2$  мкм.

Рисунок 12 – Точечные диаграммы радиального биения  $Frr$ :  
1 – после зубофрезерования; 2 – после финишной обработки,  $N$  – количество обрабатываемых зубчатых колес

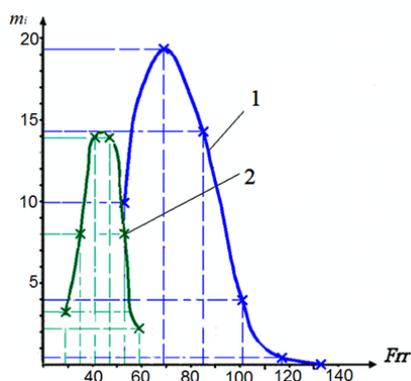


Рисунок 13 – Кривые распределения радиального биения  $Frr$ : 1 – после зубофрезерования; 2 – после финишной обработки

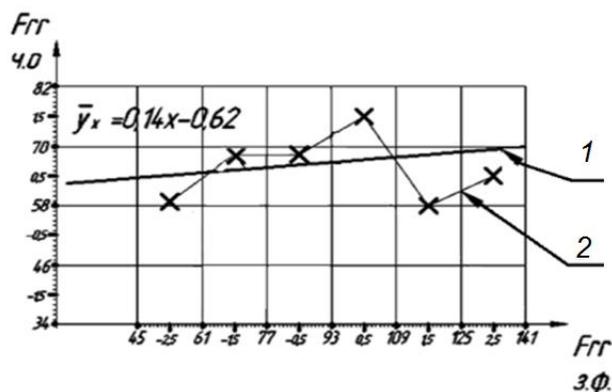


Рисунок 14 – График линейной корреляционной связи между радиальным биением после зубофрезерования и радиальным биением после финишной обработки:  
1 – теоретическая линия регрессии,  
2 – эмпирическая линия регрессии

В **заключении** приводятся основные результаты и выводы по выполненной работе.

В **приложении** содержатся тексты программ для ЭВМ: расчет инструмента с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев и комбинированным смещением производящего контура, результаты расчета инструментов с радиальным смещением производящего контура. Приводятся результаты исследований: точечные диаграммы, кривые распределения, графики линейной корреляционной связи, а также техническое задание на разработку и изготовление станка с ЧПУ для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Предложено теоретическое обоснование схем резания инструментами с искусственным микрорельефом, полученным с помощью электроэрозионной обработки. Выполнены эксперименты по обоснованию частоты вращения пары «инструмент - обрабатываемое колесо», цикличности и скорости подачи. Рекомендована частота вращения 300 об/мин, цикл обработки содержит 5..6 рабочих

проходов и 2..3 прохода выхаживания (без сближения осей), радиальная подача заготовки 0,03..0,05 мм.

2 Предложена схема обработки с комбинированным смещением, обеспечивающая выход полюса за пределы рабочей высоты зуба с искусственным микрорельефом поверхности, для обеспечения относительной скорости в паре «инструмент - обрабатываемое колесо» в пределах требуемых условий резания ( $V > 1 \dots 5$  м/мин).

3 Установлена степень влияния схемы радиального и тангенциального смещения обработки зубчатых колес инструментом с искусственным микрорельефом рабочей поверхности. Совместное влияние обеспечивает улучшение качественных показателей обработанных зубчатых колес.

4 Разработана методика проектирования инструмента для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес с комбинированным смещением ПРК, позволяющая достигать геометро-кинематические характеристики зубчатых колес, в пределах 7..8 степени точности ГОСТ 1643-82. Разработано программное обеспечение для автоматизации процесса проектирования инструмента и сокращения сроков технической подготовки производства. Запатентован метод обработки (патент 2536308).

5 Созданы конструкции инструментов для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес:

а) инструмент с искусственным трехмерным микрорельефом рабочей поверхности зубьев, образованный электроэрозионным способом (патент 120024);

б) инструмент с линейчатым микрорельефом, образованный вырезанием непрофилированным электродом - проволочкой (патент 160129);

в) инструмент, на поверхность которого нанесен с помощью электроискрового легирования твердый сплав.

6 Разработана технология финишной обработки цилиндрических зубчатых колес инструментом с искусственным микрорельефом, обработано 50 штук, с параметрами  $m = 2$ ,  $z = 16$ , проведены экспериментальные исследования качества финишной обработки. Установлено:

а) исправление погрешности предварительной обработки по параметрам  $F_r$ ,  $F_{vw}$  на 1..2 степени (ГОСТ 1643-82).

б) снижение шероховатости обработанной поверхности с  $R_a = 4,8$  мкм после предварительной обработки до  $R_a = 1,2$  мкм после финишной обработки.

7 Разработано техническое задание на станок с ЧПУ для финишной обработки цилиндрических зубчатых колес, согласованное с предприятием ООО «Морена».

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ**

**1 Валиков Е.Н., Тимофеев Ю.С., Журина А.С. Инструмент для финишной отделки зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8. 2013. С. 254-259.**

**2 Валиков Е.Н., Тимофеев Ю.С., Журина А.С. Зубчатый обкатник для обработки кромок зубьев крупногабаритных зубчатых колес// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 8 С. 260-263**

**3 Валиков Е.Н., Тимофеев Ю.С., Журина А.С. Финишная отделка зубчатых колес с использованием режущих свойств поверхностей после электроэрозионной обработки //Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. Вып. 12. Ч.1. С. 17-20.**

**4 Валиков Е.Н., Журина А.С., Тимофеев Ю.С. Анализ процесса резания инструментом с искусственным микрорельефом рабочей поверхности, сформированным электроэрозионными методом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. Вып. 11. В 3 ч. Ч.1. Изд-во ТулГУ, С. 313-318.**

5 Валиков Е.Н., Журина А.С. Технологические возможности чистовой обработки цилиндрических зубчатых колес «Шарошкой»// VIII Региональная магистерская научная конференция: докл. /под научн. ред. д-ра техн. наук, проф. Е.А. Ядыкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч.1. С. 124-126.

6 Валиков Е.Н., Журина А.С., Тимофеев Ю.С. Новые инструменты с искусственным микрорельефом рабочих поверхностей зубьев для обработки цилиндрических зубчатых колес // Высокие, критические электро- и нанотехнологии: Тр. Всеросс. науч.-техн. конф. Тула, 19 декабря 2017 г. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 135-139.

7 Пат. 120024 Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> В21Н 5/02. Инструмент для обработки зубчатых колес / Е.Н.Валиков, В.А. Беликова, Н.С. Петрухин, Ю.С. Тимофеев, А.С. Журина заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет № 2012106997; заявл. 27.02.2012, опубл. 10.09.2012. Бюл. № 25. 2 с.: ил.

8 Пат. 2536308 Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> В21Н 5/02. Способ режуще-деформирующей обработки зубьев зубчатых колес. / Е. А. Дронов, Е. Н. Валиков, В.А. Белякова, Н. С. Петрухин, Ю.С. Тимофеев, А. С. Журина заявитель и патентообладатель: Открытое Акционерное общество акционерная компания «Туламашзавод». № 2013143486/02; заявл. 26.09.2013, опубл. 20.12.2014, Бюл. № 255. 11 с.: ил.

9 Пат. 160129 Рос. Федерация, МПК<sup>7</sup> В21Н 5/02. Инструмент для обработки зубчатых колес / Е.Н. Валиков, В.А. Беликова, Ю.С. Тимофеев, А.С. Журина заявитель и патентообладатель Тульский государственный университет. № 2015110534/02; заявл. 24.03.2015, опубл. 10.03.2016. Бюл. № 7. 2 с.: ил.