

На правах рукописи



АНИСИМОВ РОМАН ВИКТОРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ КОЛЕС
С ВНУТРЕННИМИ НЕЭВОЛЬВЕНТНЫМИ ЗУБЬЯМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел 2013

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения и конструкторско-технологическая информатика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор
Тарапанов Александр Сергеевич

Официальные оппоненты

доктор технических наук, профессор
Ивахненко Александр Геннадиевич
ФГБОУ ВПО «Юго-западный
государственный университет»
профессор кафедры «Управление
качеством, метрология и сертификация»

кандидат технических наук, доцент
Сотников Владимир Ильич
ФГБОУ ВПО «Госуниверсите-УНПК»
заведующий кафедрой
«Автоматизированные станочные и
инструментальные системы»

Ведущая организация

ФГБОУ ВПО «Московский
государственный университет
приборостроения и информатики»

Защита диссертации состоится «15» марта 2013 г. в «15⁰⁰» часов в ауд. 212 на заседании диссертационного совета Д 212.182.06 по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, главный корпус, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29).

Автореферат разослан «7» февраля 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Василенко Юрий Валерьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Зубчатые зацепления с внутренними зубьями получили широкое распространение в современном машиностроении. Они применяются в конструкциях механизмов буровых установок, дорожно-строительных машин и т.д. Их использование обуславливается высокими требованиями к качеству. Долговечность и стабильность работы узлов зависит от точности изготовления зубьев. Основными достоинствами применения зубчатого зацепления с внутренними зубьями по сравнению с внешним зубчатым зацеплением являются более высокий КПД, более высокая нагрузочная способность, существенное уменьшение габаритов конструкций, в которых они применяются. В таких изделиях помимо традиционного эвольвентного профиля зуба в последнее время активно применяют зубья неэвольвентного профиля – треугольного, циклоидального, профиля храпового зацепления и т.д. Это обусловлено, во-первых, конструктивным назначением механизма, а во-вторых, определенными преимуществами каждого из этих профилей перед эвольвентным.

В условиях современной экономики, когда на предприятиях тип производства редко превышает среднесерийный, а в основном это единичный и мелкосерийный, наиболее эффективной является обработка зубодолблением.

Внедрение в производство зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля, появление новых инструментальных и обрабатываемых материалов заставляет заново производить трудоемкие и дорогостоящие исследования по определению режимов резания, степени влияния их на точность поверхности. Как следствие этого необходимо проводить теоретические исследования влияния метода и режима обработки, а также формы зуба на кинематические, силовые характеристики процесса, точность и шероховатость получаемой поверхности, износ инструмента и производительность процесса.

Получение требуемых показателей качества и максимальной производительности процесса, а также профилирование инструмента на стадии предварительного проектирования делает актуальной задачу разработки методики комплексного анализа параметров профиля зуба, физико-механических свойств инструментального материала и материала заготовки, параметров геометрии инструмента и заготовки, кинематических и динамических характеристик процессов обработки зубчатых колес с внутренними зубьями.

Цель работы. Профилирование долбяков для зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля и комплексный анализ процесса их формообразования.

Для достижения указанной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать комплекс универсального математического обеспечения профилирования инструмента и отображения схемы резания для зубодолбления колес с внутренними неэвольвентными зубьями.
2. На основе разработанного отображения схемы резания провести анализ кинематических характеристик процесса зубодолбления колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля, включающий в себя расчет толщин срезаемого слоя и рабочих углов по периметру режущего лезвия.
3. Определить величины составляющих силы резания, установить их зависимость от формы обрабатываемого зуба и режимов обработки.
4. Определить зависимости для расчета погрешностей и шероховатости обработанной внутренней зубчатой поверхности
5. Разработать алгоритм управления параметрами качества колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.

6. Дать экспериментальную оценку адекватности и применимости полученных теоретических зависимостей.

7. Разработать практические рекомендации, направленные на повышение производительности процесса, а также возможное снижение погрешности и шероховатости поверхности внутренних неэвольвентных зубьев зубчатых колес.

Объект исследования: процесс зубодолбления зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.

Предмет исследования: профилирование инструмента, производительность и качество обработки зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.

Методика исследований. Теоретические исследования базируются на положениях теории резания металлов, проектирования режущего инструмента, научных основ технологии машиностроения, дифференциальной геометрии, векторного анализа, инженерии поверхности.

Экспериментальные исследования проводились на действующем оборудовании в лабораториях кафедры ТМиКТИ и в реальных производственных условиях ООО «Орловский завод бурового инструмента и оборудования» (г. Орел). Измерения производились в «Центральной измерительной лаборатории» ОАО «Мценский литейный завод» (г. Мценск). В основе экспериментальных исследований использованы методы многофакторного планирования экспериментов и математической статистики.

Научная новизна работы. Разработан комплекс универсального математического обеспечения профилирования инструмента с одновременным анализом параметров процесса обработки и прогнозированием значений точности и шероховатости получаемых изделий.

На основании анализа процесса обработки выявлены закономерности соотношений составляющих силы резания для зубодолбления различных неэвольвентных зубьев, позволяющие, с учетом качества полученных поверхностей, назначать рациональные режимы обработки.

Автор защищает:

- методику комплексного анализа параметров процесса обработки колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля, сочетающую в себе профилирование долбяка с одновременным анализом параметров процесса обработки и прогнозированием точности и качества изделия.
- результаты теоретических и экспериментальных исследований обработки колес с внутренними зубьями треугольного, циклоидального профиля и профиля храпового зацепления
- технологические рекомендации по назначению рациональных режимов зубодолбления колес с внутренними неэвольвентными зубьями.

Практическая значимость заключается:

- в разработке методики профилирования долбяков для обработки колес с внутренними неэвольвентными зубьями, совмещенной с возможностью прогнозирования точности и качества изготавливаемого изделия;
- в разработке алгоритма проектирования процесса обработки, в котором процесс профилирования долбяка совмещен с анализом процесса зубодолбления.
- в разработке рациональных технологических режимов зубодолбления колес с внутренними неэвольвентными зубьями, определенных с помощью методики комплексного анализа параметров процесса обработки;

Реализация результатов работы: разработанный и сконструированный инструмент и рекомендуемые режимы зубодолбления апробированы и приняты к внедрению на ООО «Орловский завод бурового инструмента и оборудования» при обработке зубчатых колес с внутренними зубьями треугольного профиля (экономический эффект 225 259 руб.).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на международных и региональных научно-технических конференциях: «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России» (Орёл-Ливны, 2010 г.); «Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии» (г. Орел, 2010, 2011 г.); Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса», г. Орел, 2011 г.; Международная молодежная конференция «XXXVIII Гагаринские чтения», 2012 г.; Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии», г. Липецк, 2012 г.; XV Международная научно-техническая конференция «Технология-2012», 2012 г.; ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава (г. Орел, 2009-2012 г.г.).

Диссертация выполнялась при поддержке гранта администрации Орловской области №12-08-97605 р_центр_а «Разработка математических моделей вновь создаваемых и существующих прогрессивных процессов формирования сложных поверхностей деталей, основанных на многопараметрическом анализе нано-элементов пространства обработки».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 4 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов диссертационных исследований, и получены 2 патента Российской Федерации на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 172 страницах основного текста, содержит 74 рисунка и 13 таблиц. Состоит из введения, четырех глав, списка литературы, включающего 98 наименований, и приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, определены цель, задачи, объект, предмет и методы исследования, раскрыта научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены основные группы зубчатых колес с внутренними зубьями и наиболее распространенные профили зубьев, отличительные особенности, области применения, достоинства и недостатки. Проведен анализ работ посвященных обработке зубчатых поверхностей и профилированию инструмента. Исследования в данной области в разное время проводили С.И. Лашнев, В.М. Матюшин, В.Ф. Романов, Г.Н. Сахаров, И.И. Семенченко, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов, Ю.В. Цвис, М.И. Юликов и др.

Одной из главных проблем при получении внутренних зубьев изделий является операция, определяющая точность зубчатых колес. Рассмотрены основные методы обработки и инструмент для формирования зубчатых венцов колес с внутренними зубьями. В наиболее распространенном в последнее время серийном производстве практически единственной операцией, обеспечивающей необходимую производительность и точ-

ность, при минимальной себестоимости является зубодолбление. Рассматриваются современные зубодолбежные станки, применяемые для обработки колес с внутренними зубьями. Выделены основные направления развития зубодолбежного оборудования. Определены основные виды и причины износа зуборезных долбяков.

Проанализировано состояние вопроса расчета составляющих сил резания при зубодолблении внутренних зубчатых венцов. Рассмотрены влияния силы резания и изменения её составляющих в процессе обработки на точность и шероховатость зубчатой поверхности при зубодолблении. Определены основные направления по управлению параметрами точности и шероховатости зубчатых поверхностей.

На основании проведенного анализа работ сделан вывод о том, что в настоящее время не существует обобщенной методики теоретической оценки обработки зубодолблением неэвольвентных зубчатых колес с внутренними зубьями, которая позволяла бы производить исследование процесса обработки изделий с целью прогнозирования параметров процесса резания и профилирования инструмента на этапе разработки технологического процесса.

Во второй главе представлена методика, сочетающая в себе процесс профилирования с анализом выходных параметров.

На этапе профилирования долбяка задается профиль впадины зубчатого колеса с внутренними неэвольвентными зубьями при помощи набора кривых, представленных в параметрическом виде. Представленный в диссертации набор составляющих профиля может быть расширен для принципиально новых изделий, что позволяет получить соответствующий профиль зуба инструмента по нижеизложенной методике.

Для отображения пространства профилирования разработана математическая модель. Основу предлагаемого метода профилирования инструмента составляет математическое описание процесса формообразования (рисунок 1), заключающегося в обработке зубчатой поверхностью 1 профиля долбяка 2, которое представлено выражением, описывающим положение каждой точки профиля впадины зубчатого колеса с внутренними неэвольвентными зубьями в любой момент обработки:

$$\begin{aligned}
 X &= -a_w \sin \left[U_1 \left(\Phi + \frac{S_{кр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) \right] + \sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2} \cdot \sin \left[(U_1 - 1) \left(\Phi + \frac{S_{окр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) + \arcsin \left(\frac{x_{li}}{\sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2}} \right) \right]; \\
 Y &= -a_w \cos \left[U_1 \left(\Phi + \frac{S_{кр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) \right] + \sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2} \cos \left[(U_1 - 1) \left(\Phi + \frac{S_{окр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) + \arcsin \left(\frac{x_{li}}{\sqrt{x_{li}^2 + y_{li}^2}} \right) \right]; \\
 Z &= l
 \end{aligned} \quad (1)$$

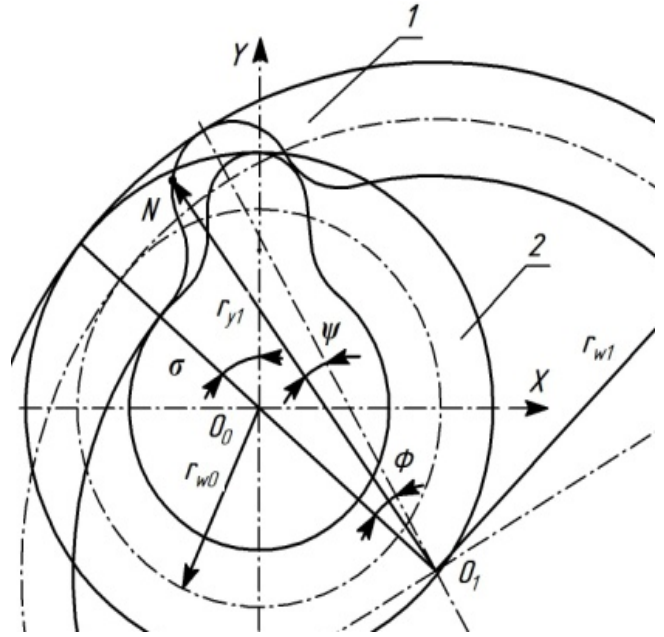


Рис. 1. Схема определения положения впадины колеса 1 относительно зуба долбяка 2 при профилировании.

где a_w - межосевое расстояние долбяка и зубчатого колеса с внутренними зубьями, U_1 - отношение числа зубьев колеса к числу зубьев долбяка, Φ – угол определяющий положение впадины колеса относительно межосевого расстояния, $S_{окр}$ - окружная подача, r_0 - радиус делительной окружности долбяка, l – ширина зубчатого венца, L - длина хода штосселя станка, x_{li} и y_{li} - координаты точки профиля впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями.

Методика профилирования строится на анализе процесса взаимного обката детали (рисунок 2) относительно режущего инструмента, выступающего в данный момент в роли обрабатываемой заготовки. Для каждого положения впадины зуба колеса существует одна точка взаимного контакта с проектируемым режущим лезвием инструмента, которая характеризуется толщиной срезаемого слоя близкой к нулю.

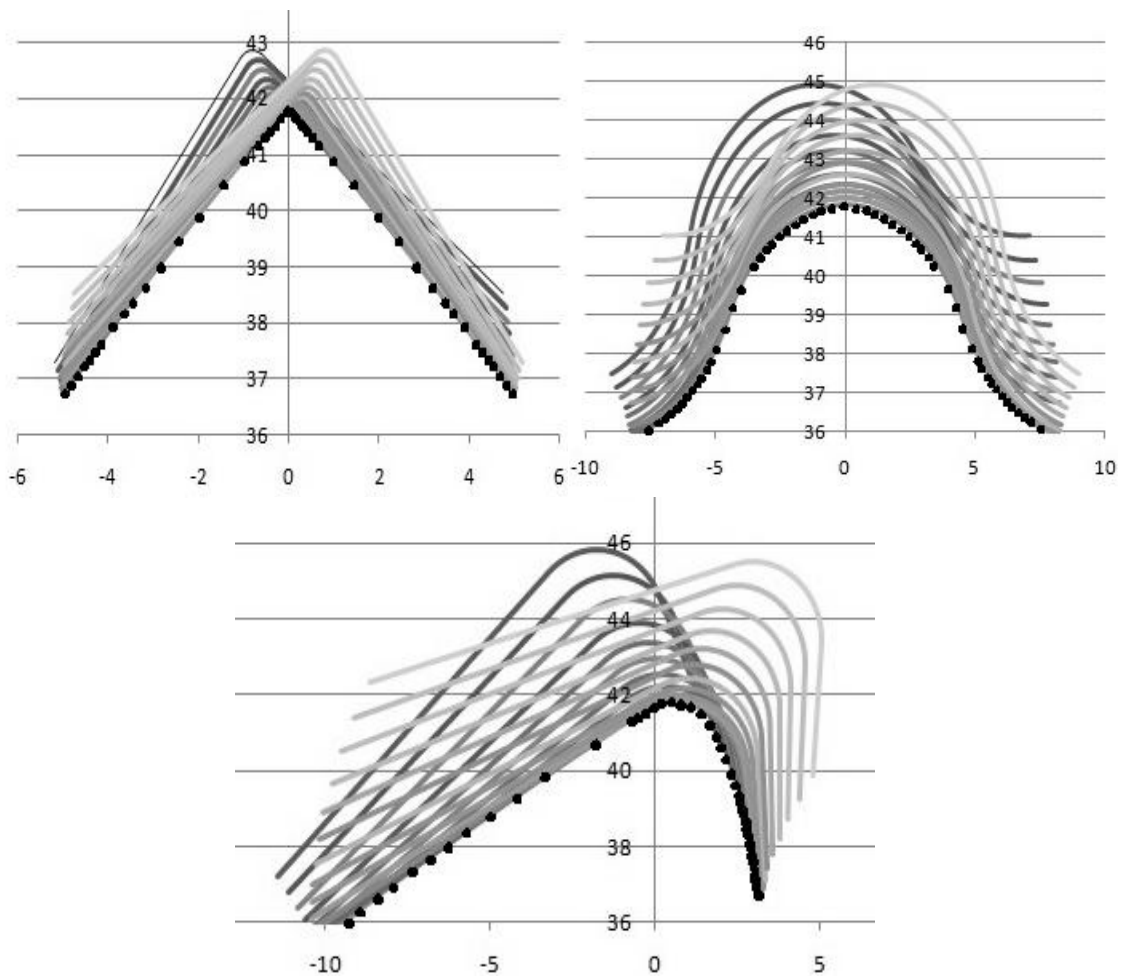


Рисунок 2. Схемы обката впадины детали относительно режущего инструмента при профилировании зубьев долбяка: А- треугольного профиля, Б- циклоидального профиля, В- профиля храпового зацепления

По данной методике были спрофилированы долбяки для обработки зубчатых колес с внутренними треугольными и циклоидальными зубьями, зубьями храпового зацепления. Результаты профилирования представлены на рисунке 3. На рисунке 4 представлен изготовленный инструмент с профилем зуба, полученным по предлагаемой методике, и обработанное им зубчатое колесо.

Анализ параметров процесса основывается на математическом отображении схемы резания. При разработке данного отображения были приняты следующие допущения:

- технологическая система принимается абсолютно жесткой,
- лезвия инструмента представляют собой геометрические линии.

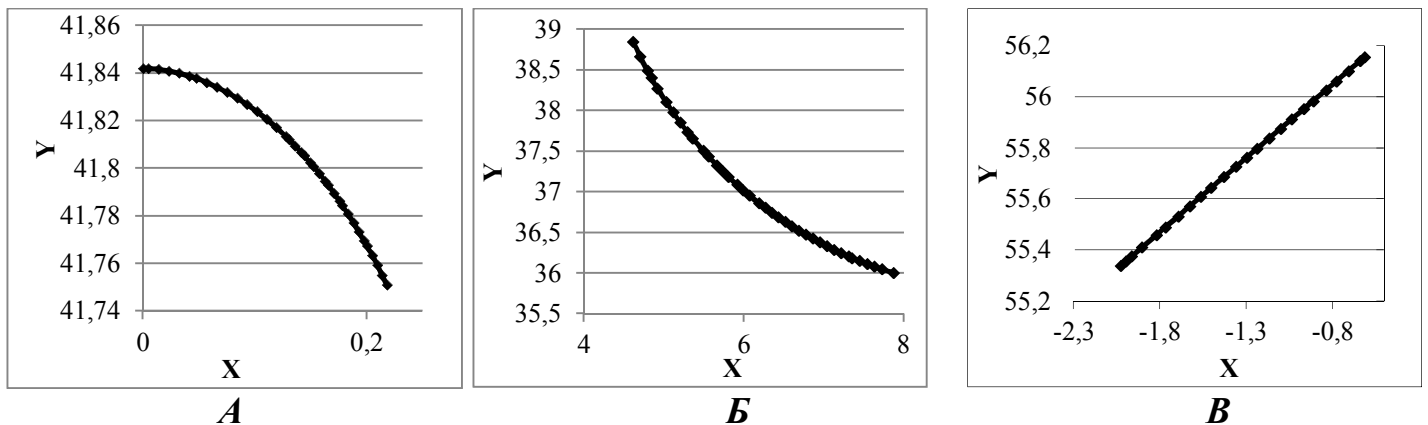


Рис. 3. Составляющие профиля зуба долбяка при обработке колес с внутренними неэвольвентными зубьями:

А- радиусная вершина зуба долбяка для обработки внутренних треугольных зубьев, Б- входное лезвие зуба долбяка для обработки внутренних циклоидальных зубьев, В- выходное лезвие долбяка для обработки внутренних зубьев храпового зацепления.



Рис. 4. Спрофилированный инструмент и изготавливаемое изделие

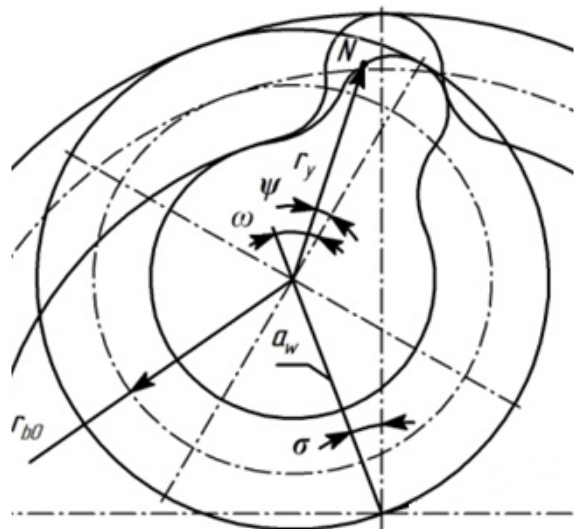


Рис. 5. Схема определения положения зуба долбяка относительно зубчатого колеса при комплексном анализе процесса формообразования.

Обработка колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля характеризуется взаимным обкатом точек режущих лезвий инструмента (рисунок 5), которые перемещаются относительно обрабатываемой заготовки по траекториям – гипоциклоидам (удлиненным и укороченным). Уравнения перемещения точек режущих лезвий долбяка и его центра относительно детали наиболее целесообразно представить в параметрической форме:

$$\begin{aligned}
 X &= a_{\omega_0} \sin \left[U_0 \left(\omega + \frac{S_{кр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) \right] + \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2} \sin \left[(1 - U_0) \left(\omega + \frac{S_{окр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) + \arcsin \left(\frac{x_{0i}}{\sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2}} \right) \right]; \\
 Y &= a_{\omega_0} \cos \left[U_0 \left(\omega + \frac{S_{кр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) \right] + \sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2} \cos \left[(1 - U_0) \left(\omega + \frac{S_{окр}}{r_0} \left(1 + \frac{l}{2L} \right) \right) + \arcsin \left(\frac{x_{0i}}{\sqrt{x_{0i}^2 + y_{0i}^2}} \right) \right]; \quad (2)
 \end{aligned}$$

$$Z = l.$$

где a_{ω_0} - межосевое расстояние долбяка и обрабатываемого колеса, U_0 - отношение числа зубьев долбяка к числу зубьев колеса, ω - угол, определяющий положение зуба долбяка относительно межосевого расстояния, $S_{кр}$ - окружная подача, r_0 - радиус делительной окружности долбяка, l - ширина зубчатого венца, L - длина хода штосселя станка, x_{0i} и y_{0i} координаты точки профиля зуба долбяка, полученные после профилирования.

Анализ полученного отображения схемы резания позволяет определять кинематические изменения углов по периметру режущей кромки и толщину срезаемого слоя материала для любой точки профиля и в любой момент, что является основой прогнозирования составляющих силы резания, а впоследствии шероховатости поверхности зубчатого венца неэвольвентных колес с внутренними зубьями и точности их обработки.

Определение точек профилирования, геометрических и кинематических параметров обработки внутренних неэвольвентных зубчатых венцов проводилось с использованием дифференциальной геометрии, по схемам, представленным на рисунках 6 и 7:

$$a = \left(\frac{a_x V_{Xs} + a_y V_{Ys} + a_z V_{Zs}}{\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}} \right); \Delta\gamma = \arctg \left(\frac{a}{\sqrt{V_{Xv}^2 + V_{Yv}^2 + V_{Zv}^2}} \right); \Delta\alpha = \arctg \frac{\sqrt{V_{Xs}^2 + V_{Ys}^2 + V_{Zs}^2}}{\sqrt{V_{Xv}^2 + V_{Yv}^2 + V_{Zv}^2}}; \quad (3)$$

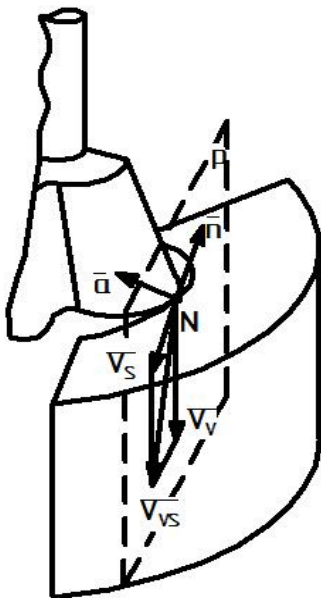


Рис. 6. Схема определения точек профилирования

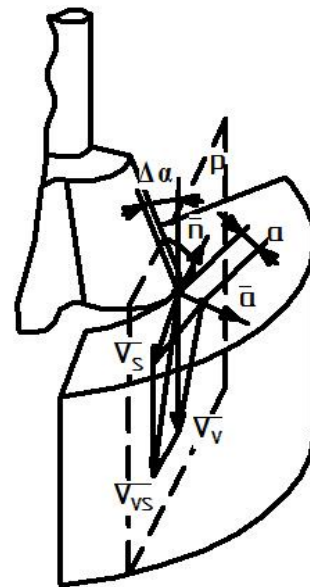


Рис. 7. Схема определения изменения кинематических параметров

Теоретические исследования обработки зубодолблением колес с внутренними треугольными, циклоидальными зубьями и зубьями храпового зацепления проводилось при следующих общих параметрах: высота зубьев $h=5$ мм, число колеса $z_l = 19$, число зубьев долбяка $z_0 = 14$, толщина зубчатого венца $b=90$ мм, материал зубчатого колеса - сталь 45,

материал инструмента- Р6М5, окружная подача $S_{окр} = 0,44$ мм/дв.ход, скорость резания $V_{рез} = 20$ м/мин.

Анализом полученных данных установлено, что при зубодолблении профиль зуба инструмента оказывает существенное влияние на изменение толщины срезаемых слоев. При зубодолблении колес с внутренними неэвольвентными зубьями при одинаковых режимах обработки и одинаковых высотах профиля соотношение между нагружением входного и выходного лезвия составляет для эвольвентной впадины - 1,2; для треугольной и храповой впадины - 1,3; для циклоидальной - 2.

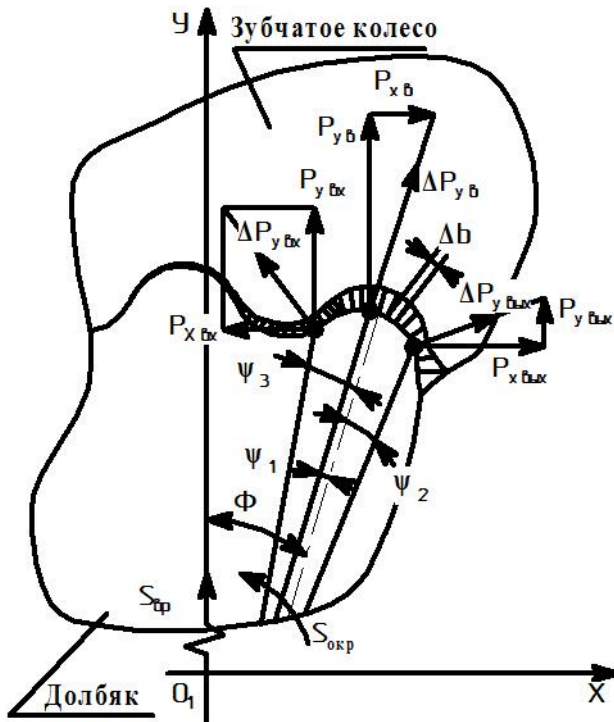


Рис. 8 Схема определения суммарных составляющих силы резания

элементарном участке режущего лезвия, по схеме, представленной на рисунке 8, и формулам:

$$\begin{aligned} P_y &= \sum \Delta P_y \Delta b \cos(\Phi + \psi_{y0}) K_{сл} \\ P_x &= \sum \Delta P_x \Delta b \sin(\Phi + \psi_{y0}) K_{сл} \\ P_z &= \sum \Delta P_z \Delta b K_{сл} \end{aligned} \quad (4)$$

где ΔP_y , ΔP_z - удельные силы резания, Δb - элементарный участок режущего лезвия, Φ - угол определяющий положение впадины колеса относительно межосевого расстояния, ψ_{y0} - угол между радиус-вектором точки режущего лезвия долбяка и линией симметрии зуба, $K_{сл}$ - коэффициент сложности формирования стружки.

На рисунке 9 представлены графики изменения составляющих силы резания при обработке одним зубом долбяка впадины зубчатого колеса с внутренними зубьями эвольвентного, треугольного, циклоидального профиля и профиля храпового зацепления из стали 45 при высоте зуба $h=5$ мм, $S_{окр}=0,44$ мм/дв.ход, $V=20$ м/мин. Из графиков видно, что профиль обрабатываемой впадины оказывает прямое влияние на составляющие силы резания, что связано с изменением длины активной режущей кромки лезвия зуба долбяка и суммарной площади срезаемого слоя материала во время обработки.

Методика расчета составляющих силы резания процесса зубодолбления колес с внутренними зубьями заключается в определении удельных сил на единицу длины режущего лезвия долбяка и последующего суммирования их по всем режущим кромкам, участвующим в резании. Для определения удельной силы резания ΔP (Н/мм) применяются полученные экспериментально зависимости силы резания для диапазона толщин срезаемого слоя от 0,01 до 0,5 мм, передних углов - от -0,0175 рад до 0,0349 рад и задних углов - от $0,873 \cdot 10^{-2}$ рад до 0,0524 рад, а так же диапазона срезаемых толщин от 0 до 0,01 мм. Такое разделение необходимо для учета процесса срезаания и смятия слоя металла, удаляемого различными участками режущего лезвия. Значения составляющих силы резания для всех режущих лезвий, получают путем суммирования удельных сил, возникающих на эле-

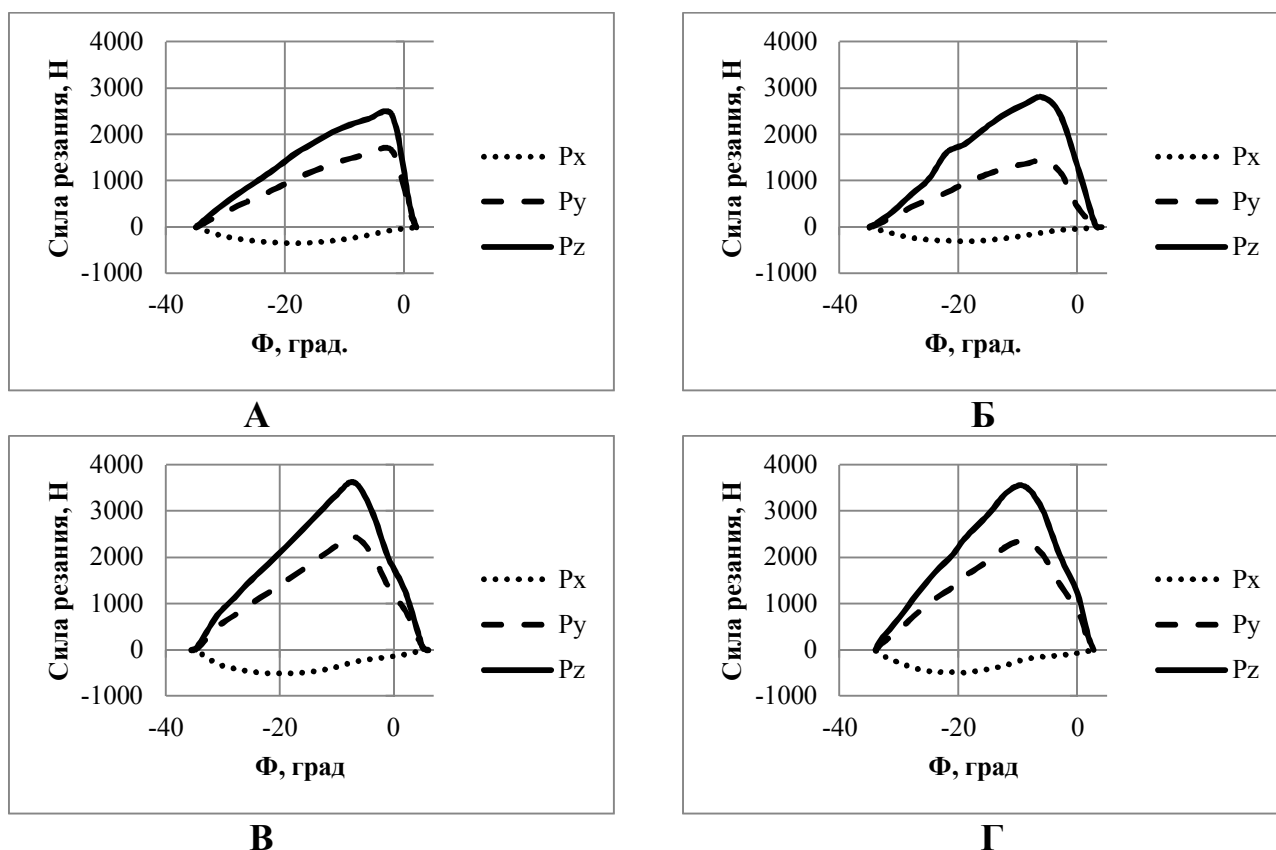


Рис. 9. Силы резания при работе одного зуба долбяка при зубодолблении колес с внутренними зубьями: А- эвольвентного профиля, Б - треугольного профиля, В- циклоидально профиля, Г- профиля храпового зацепления

На рисунках 10 и 11 представлено изменение составляющих силы резания во время работы всех зубьев, находящихся в резании, при обработке колес с внутренними эвольвентными, треугольными, циклоидальными зубьями и зубьями храпового зацепления. Исследования составляющих силы резания показали, что зубодолбление колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля из стали 45 при высоте зуба $h=5$ мм, $S_{окр}=0,44$ мм/дв.ход, $V=20$ м/мин характеризуется следующими соотношениями: обработка треугольного профиля и эвольвентного - $P_{yT}/P_{yЭ}=0,81$, $P_{zT}/P_{zЭ}=1,09$, $P_{zЦ}/P_{zЭ}=1,28$, циклоидального профиля и эвольвентного $P_{yЦ}/P_{yЭ}=1,38$, $P_{zЦ}/P_{zЭ}=1,38$, храпового профиля и эвольвентного - $P_{yX}/P_{yЭ}=1,27$, $P_{zX}/P_{zЭ}=1,28$.

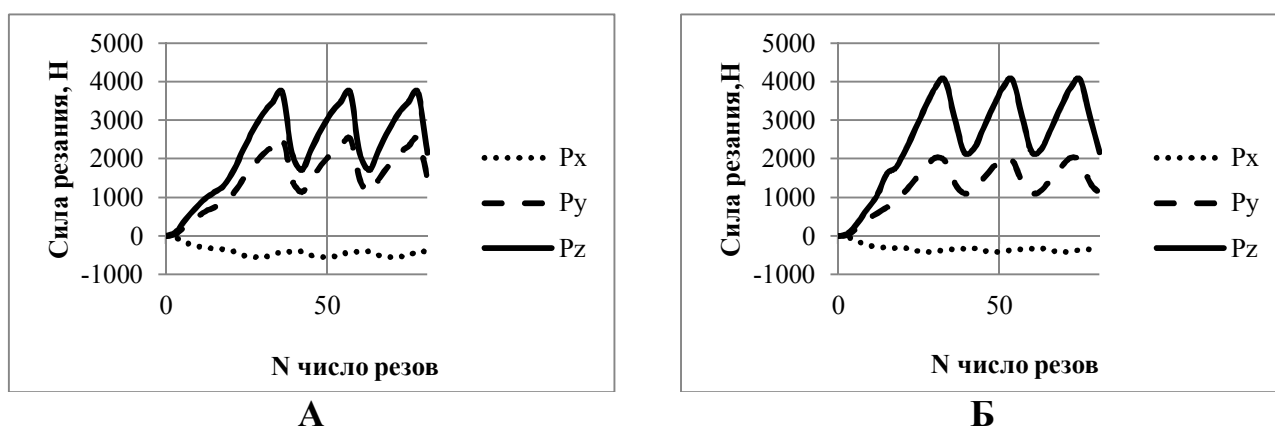


Рис. 10. Силы резания при зубодолблении колес с внутренними зубьями: А- эвольвентного профиля, Б - треугольного профиля

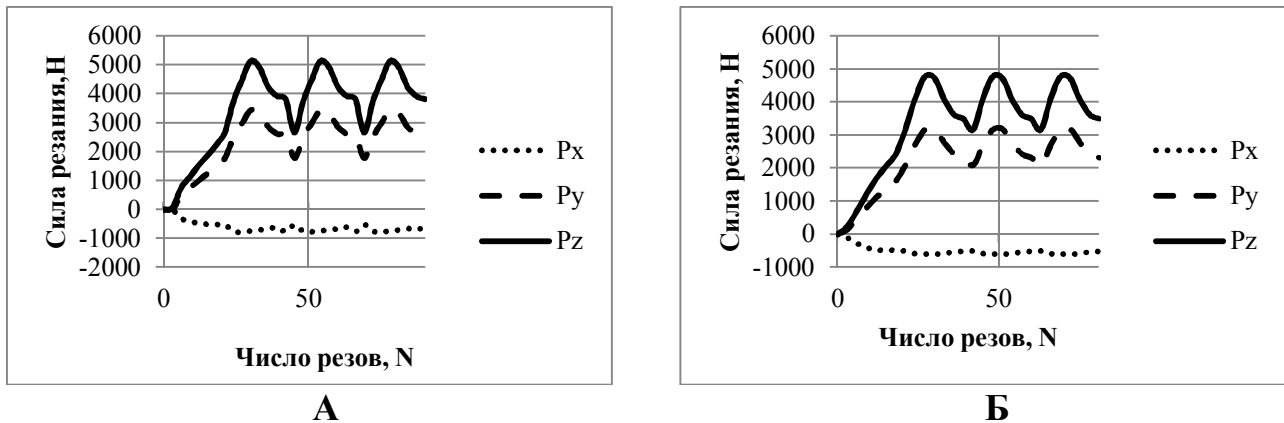


Рис. 11. Силы резания при зубодолблении колес с внутренними зубьями:
 А - циклоидального профиля, Б – профиля храпового зацепления

Прогнозирование сил резания является основой определения погрешностей, возникающих при зубодолблении колес с внутренними зубьями, и шероховатости обработанной поверхности.

Анализ данных исследования точности изготовления зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля показал, что наибольшие суммарные погрешности возникают при обработке колес с внутренними зубьями циклоидального профиля. Это связано с большими значениями возникающих составляющих силы резания при обработке вышеуказанных профилей. Для снижения погрешностей обработки необходимо назначение оптимальных режимов резания. В данной работе были предложены оптимальные режимы резания при обработке колес с внутренними зубьями треугольного, циклоидального профиля и профиля храпового зацепления.

Расчет и прогнозирование величины шероховатости обработанной поверхности производился в соответствии с положениями учения об инженерии поверхности, учитывая динамические и кинематические особенности процесса зубодолбления внутренних зубчатых венцов. В качестве базовой модели использована модель Сулова А.Г.. Составляющие h_2 , h_3 и h_4 определялись по зависимостям, полученным автором теории для лезвийной обработки. При расчете составляющей шероховатости h_1 были разработаны зависимости для различных составляющих профиля впадины зубчатого колеса с внутренними неэвольвентными зубьями.

Прогнозирование параметров шероховатости на основе разработанного математического обеспечения показало, что составляющая h_1 принимает значения до 0,004 мм. Основное влияние на высоту микронеровностей оказывает составляющая h_2 , величина которого зависит от профиля инструмента и значения которого представлено на рисунке 12. По результатам теоретических исследований были получены уравнения регрессии для определения шероховатости обработанной зубчатой поверхности в зависимости от высоты зуба h , скорости резания V и окружной подачи $S_{окр}$:

- для треугольного профиля:

$$Ra = -1.27 + 0.004 \cdot V + 0.795 \cdot S_{окр} + 0,961 \cdot h + 0.227 \cdot S_{окр} \cdot h$$

-для циклоидального профиля

$$Ra = -0.412 + 0.005 \cdot V + 0.757 \cdot S_{окр} + 0.733 \cdot h$$

- для профиля храпового зацепления

$$Ra = -0.855 + 0.003 \cdot V + 0.909 \cdot S_{окр} + 0.767 \cdot h$$

На основе проведенных исследований установлено, что на величину шероховатости обработанной зубчатой поверхности основное влияние оказывают профиль и высота обрабатываемого зуба, подача, геометрия инструмента, физико-механические свойства обрабатываемого материала.

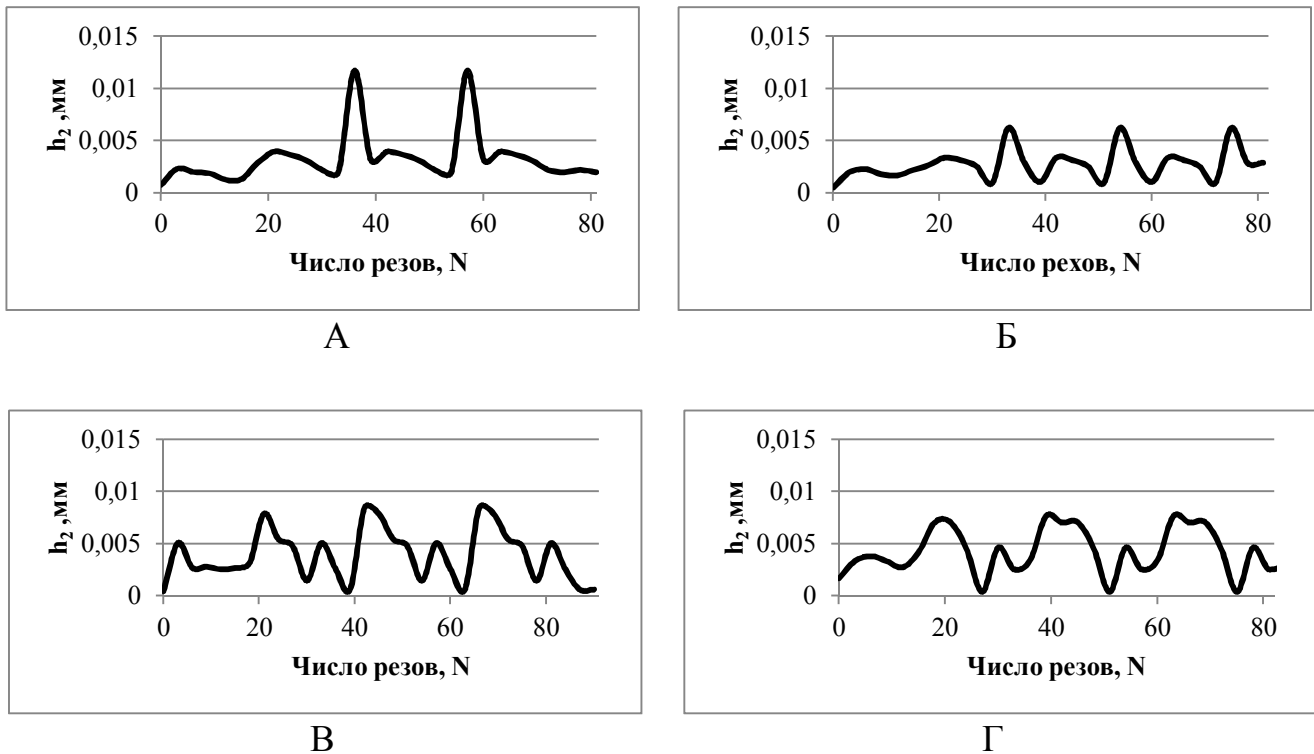


Рис. 12. Величина параметра шероховатости h_2 при обработке колес с внутренними зубьями: А- эвольвентного профиля, Б – треугольного профиля, В- циклоидального профиля, Г – профиля храпового зацепления

Для снижения шероховатости зубчатых неэвольвентных поверхностей был разработан новый способ «Зубоиглошевингование» (патент РФ № 2446035), который осуществляется оригинальной конструкцией инструмента - «Зубоиглошевером», подтвержденной патентом РФ №2440217.

Разработан алгоритм программы, который представлен функциональной схемой на рисунке 13. В данном алгоритме процесс профилирования долбяка совмещен с анализом параметров процесса резания, что позволяет определить оптимальные значения выходных параметров зубодолбления колес с внутренними зубьями.

В третьей главе излагаются методики проведения экспериментов, которые основываются на применении современных технических средств. Исследования составляющих силы резания при зубодолблении колес с внутренними неэвольвентными зубьями производилось с помощью универсального динамометра Мухина, персонального компьютера и среды LabView.

Исследование точности зубчатых колес изготовленных спрофилированным инструментом предложено определять с помощью современной координатно-измерительной машины Prismo 7 (рисунок 14). Использование данного оборудования позволило автоматизировать процесс проведения измерения и достигнуть высокой точности измерения.

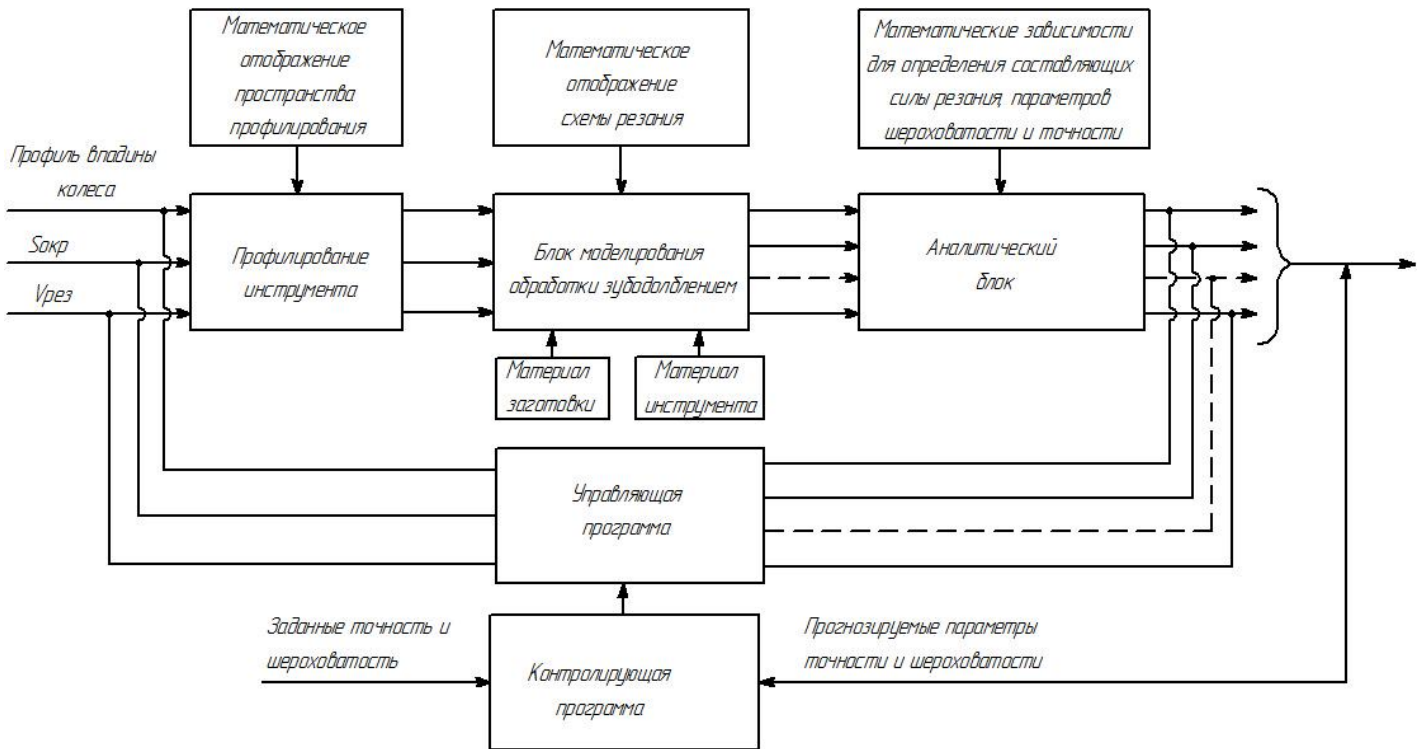


Рис. 13. Функциональная схема

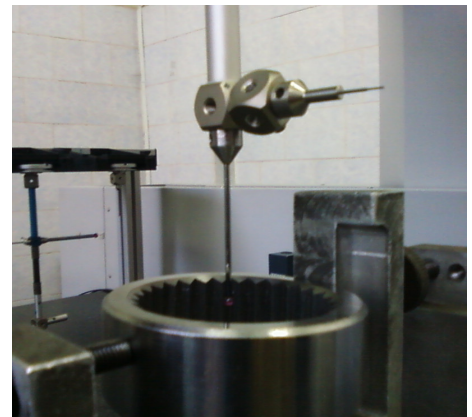
В четвертой главе проведено экспериментальное исследование составляющих сил резания. Установлено, что разница в значениях силы резания между теоретическими данными и полученными экспериментальным путем составляет 4-11%. Причем до 4% отличается составляющая P_x , до 11% - составляющие P_y и P_z . Так же было установлено, что при увеличении круговой подачи составляющие силы резания и амплитуда их колебания растут не пропорционально подаче. Это объясняется тем, что при увеличении окружной подачи увеличиваются толщины срезаемого слоя и уменьшается удельная сила, что сдерживает рост силы резания.

При исследовании точности и шероховатости установлено, что точность изделий, изготовленных спрофилированным инструментом, соответствует требованиям чертежа и прогнозируемым значениям, а прогнозируемые значения шероховатости отличаются от полученных экспериментально на 8-12%.

Проведена реализация результатов исследования и расчет экономической эффективности обработки при производстве изделий «Кулачок» (черт. НКР100М-1-1038), «Кольцо храповое» (черт. ПП54В.023), «Кольцо храповое» (черт. ПТ48.014) с внутренними зубьями треугольного профиля на ООО «Орловский завод бурового инструмента и оборудования». Экономический эффект составил 225 259 рублей



А



Б

Рис. 14. Процесс измерения на КИМ Prizmo 7
А- внешний вид КИМ, Б- процесс контроля

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. В представленной научно-квалификационной работе изложен комплекс обоснованных технических и технологических решений, направленных на повышение производительности, качества и точности зубодолбления колес с внутренними неэвольвентными зубьями за счет применения методики комплексного анализа процесса зубодолбления

2. Разработана методика комплексного анализа и алгоритм, которые совмещают профилирование инструмента и прогнозирование результатов обработки колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля, что позволяет осуществить проектирование профилей долбяков для любых неэвольвентных колес внутреннего зацепления с одновременным анализом значений точности получаемых изделий и качества поверхности зубьев.

3. Разработан комплекс универсального математического обеспечения профилирования и отображения схемы резания зубодолбления колес с внутренними неэвольвентными зубьями, включающий в себя описание движений инструмента и заготовки, анализ которого с помощью положений дифференциальной геометрии позволил получить профиль инструмента и установить аналитические зависимости для определения рабочих углов режущего лезвия и толщин срезаемого слоя по профилю режущих лезвий.

4. Установлены зависимости соотношений между нагрузками входного и выходного режущего лезвия при зубодолблении колес с внутренними зубьями при одинаковой высоте зуба, которые составляют: для эвольвентных зубьев - 1,2; для треугольных зубьев и зубьев храпового зацепления - 1,3; для циклоидальных зубьев - 2.

5. Установлены численные зависимости между величинами составляющих силы резания и профилем зуба долбяка. При зубодолблении колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля выявлены следующие соотношения составляющих силы резания: обработка треугольного профиля и эвольвентного - $P_{yT}/P_{yЭ} = 0,81$, $P_{zT}/P_{zЭ} = 1,09$; циклоидального профиля и эвольвентного $P_{yЦ}/P_{yЭ} = 1,38$, $P_{zЦ}/P_{zЭ} = 1,38$; профиля храпового зацепления и эвольвентного - $P_{yX}/P_{yЭ} = 1,27$, $P_{zX}/P_{zЭ} = 1,28$.

6. Установлено, что профиль зуба долбяка оказывает влияние на величину шероховатости обработанной зубчатой поверхности и точность. При одинаковых режимах зубодолбления прогнозируемые шероховатость и точность по радиальному биению имеют максимальные значения при обработке циклоидального профиля $Ra = 4.6$ мкм, $F_r = 44$ мкм, минимальные - при обработке треугольного $Ra = 3.2$ мкм, $F_r = 26$ мкм, что создает резерв для повышения производительности зубодолбления колес с внутренними зубьями треугольного профиля.

7. Выявлено, что экспериментально определенные величины составляющих силы резания, шероховатость, точность при зубодолблении колес с внутренними треугольными зубьями и зубьями храпового зацепления отличаются от теоретически рассчитанных для данной детали на 4–12%.

8. Разработаны практические рекомендации, направленные на повышение производительности процесса, а так же возможное снижение погрешности и шероховатости поверхности внутренних неэвольвентных зубьев.

9. На основании полученных результатов профилирования и исследования процессов зубодолбления колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля разработан и внедрен технологический процесс на предприятии ООО «Орловский завод бурового оборудования и инструмента», включающий спроектированный инструмент и рекомендуемые режимы обработки, что позволило получить экономический эффект 225 259 рублей при производстве изделий «Кулачок» (черт. НКР100М-1-1038), «Кольцо храповое» (черт. ПП54В.023), «Кольцо храповое» (черт. ПТ48.014).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Анисимов Р.В.** Математическое отображение схем резания и определение толщины срезаемого слоя при обработке неэвольвентных профилей зубчатых колес с внутренними зубьями. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Миронов С.И. // *Фундаментальный и прикладные проблемы техники и технологии*: - №2/3(280).-Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2010-6с.-с.16-21

2. **Анисимов Р.В.** Математическое отображение схемы обката для профилирования долбяков обрабатывающих колеса с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Ревенков А.А.// *«Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*: - №2/3 -Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2011.– 5с.– с.18-22

3. **Анисимов Р.В.** Особенности износа инструмента при зубодолблении колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С. // *«Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*: - №3 -Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2011.– 7с.– с.99-105

4. **Анисимов Р.В.** Управление параметрами качества колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С. // *«Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии»*: - №4/2 -Орел: ИПЦ ОрелГТУ, 2011.– 6с.– с. 9-14

Список публикаций в других изданиях:

5. **Анисимов Р.В.** Современные технологии и оборудование для зубодолбления колес с внутренними зубьями [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С. // Региональная научно-практическая конференция молодых ученых и аспирантов «Научный потенциал Орловщины в модернизации промышленного комплекса малых городов России»- Орел, 2010.-5с.-с.4-8

6. **Анисимов Р.В.** Повышение качества деталей транспортных средств с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. [Текст] / **Анисимов Р.В.** // *Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса. Материалы Международной научно-практической конференции (17-18 мая, 2011). Том 1, ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».* – Орел: ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», 2011. – 5 с.-с. 91-95

7. **Анисимов Р.В.** Профилирование долбяков для колес с внутренними неэвольвентными зубьями. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С.// *Фундаментальные и прикладные проблемы модернизации современного машиностроения и металлургии: Сборник научных трудов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры технологии машиностроения ЛГТУ. 17-19 мая 2012г./ под общ. ред. проф. А.М. Козлова- Ч.1.- Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2012.-5с.-с.11-15*

8. **Анисимов Р.В.** Совершенствование технологического оснащения для нарезания колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля [Текст] / **Р.В. Анисимов**, А.С. Тарапанов, Г.А. Харламов/ // *«Научно-технические технологии в машиностроении»-№5- М.: Машиностроение, 2012.- 7с.- с.9-15*

9. **Анисимов Р.В.** Экспериментальные исследования сил резания при обработке зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля. [Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С. // *«Научно-технические технологии в машиностроении и авиадвигателестроении: Материалы IV Международной научно-технической конференции. В 2-х частях»- Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012.- Ч. I-6с.- с.263-268*

10. **Анисимов Р.В.** Прогнозирование шероховатости обработки зубчатых колес с внутренними зубьями неэвольвентного профиля.[Текст] / **Анисимов Р.В.**, Тарапанов А.С.// *Высокие технологии в машиностроении: Материалы Международной научно-технической конференции (Курган, 21-23 ноября 2012г.).- Курган: Издательство Курганского гос. ун-та, 2012-5с.- с.46-50*

Патенты РФ на изобретения:

11. Зубоиглошевер. [Текст]/Степанов Ю.С., Киричек А.В., Тарапанов А.С., **Анисимов Р.В.**, Афанасьев Б.И., Чепикова И.М.: пат. 2440217 С1 РФ №2010118254/02; заяв. 05.05.2010; опубл. 20.01.2012

12. Способ зубоиглошевингования зубчатых колес. [Текст]/Степанов Ю.С., Киричек А.В., Тарапанов А.С., **Анисимов Р.В.**, Афанасьев Б.И., Чепикова И.М.: пат. 2446135 С2 РФ №2010118255/02; заяв. 05.05.2010; опубл. 27.03.2012

Подписано в печать 26.01.2013 Формат 60×84/16. Бумага для множит. техники. Гарнитура Times New Roman. Печать электрографическая. Усл. печ. л. 1. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100 экз. Заказ №06ОП/13

Отпечатано с готового оригинал-макета на полиграфической базе
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК» 302030, г. Орел, ул. Московская, 65