

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ ЛУГАНСКОЙ
НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ "ЛУГАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ВЛАДИМИРА ДАЛЯ"**

На правах рукописи



Воронов Артур Эдуардович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ ЗУБЧАТЫХ
КОЛЕС ЗА СЧЕТ НОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ
ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ**

05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Луганск – 2018

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля" Министерства образования и науки Луганской Народной Республики, г. Луганск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Витренко Владимир Алексеевич

Официальные оппоненты: **Бутенко Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО "Южный федеральный университет",
профессор кафедры механики института
радиотехнических систем и управления

Ляхин Алексей Михайлович
кандидат технических наук,
ГОУВПО "Донецкий национальный технический
университет",
доцент кафедры "Технология машиностроения"

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Луганской Народной Республики "Донбасский
государственный технический университет"

Защита состоится «05» апреля 2018 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Донецкий национальный технический университет" по адресу: ауд. 6.202, а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +380 62 3050104,

E-mail: tm@fimm.donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Донецкий национальный технический университет" по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001, интернет <http://donntu.org>.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 01.014.02,
кандидат технических наук, доцент



Р.М. Грубка

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Зубчатые колеса находят применение во всех отраслях современной промышленности. Независимо от назначения зубчатого колеса, оно должно обладать рядом свойств, главными из которых являются: точность формы, прочность, надежность, износостойкость, себестоимость изготовления. Стремясь улучшить перечисленные свойства, ведутся активные разработки по совершенствованию процессов формообразования зубчатых колес, в частности процесса шлифования при помощи абразивных шлифовальных кругов. Такой вид обработки является одним из самых распространенных, однако его производительность находится на довольно низком уровне, поскольку удается успешно применять только однозаходные шлифовальные круги.

Высокой производительностью обработки зубьев обладает метод непрерывного шлифования на специально разработанных станках при помощи шлифовальных кругов глобоидной формы. В этом случае контакт инструмента с обрабатываемыми зубьями имеет линейный характер касания на протяжении всего процесса шлифования. Шлифование при помощи глобоидных шлифовальных кругов позволяет повысить производительность зубошлифования в два-три раза. К недостаткам метода шлифования глобоидными шлифовальными кругами можно отнести возможность обработки зубчатых колес строго определенной геометрии, а также то, что для изготовления каждого нового шлифовального круга глобоидной формы необходимо изготавливать специальное дорогостоящее алмазное цилиндрическое зубчатое колесо, в результате чего растет номенклатура таких шлифовальных кругов и алмазных зубчатых колес.

С целью повышения производительности шлифования зубьев были изготовлены абразивные круги новой формы на теле однополостного квазигиперболоида. Такие инструменты получались и 5-ти и 7-ми заходными, в результате значительно повысилась производительность и качество зубообработки. Главным недостатком такого инструмента является то, что он применим для обработки зубчатого колеса со строго определенной геометрией.

Таким образом, диссертационная работа, целью которой является повышение производительности финишной обработки зубчатых колес за счет разработки новой технологии и схемы формообразования шлифовальных кругов является актуальной.

Степень разработанности темы. В настоящее время вопросам создания новых технологий изготовления зубчатых колес для различных отраслей промышленности посвящено большое количество исследований отечественных и зарубежных ученых и специалистов (среди которых стоит отметить работы Базрова Б.М., Бутенко В.И., Витренко В.А., Вулгакова Э.Б., Гавриленко В.А., Давыдова Я.С., Дусева И.И., Ерихова М.Л., Литвина Ф.Л., Михайлова А.Н., Перепелицы Б.А., Сахарова Г.Н., Семенченко И.И., Суслова А.Г.,

Сухорукова Ю.Н., Родина П.Р., Цвиса Ю.В. и др.). Из разработок особо можно выделить технологию получения квазигиперболоидных инструментов, имеющих высокую производительность механической обработки, но обладающих недостатком, который заключается в возможности зацепления только с зубчатыми колесами с тем количеством зубьев и модулем для которых инструмент был изготовлен.

Исследования, проведенные в работе, направлены на разработку новой технологии формообразования червячного шлифовального круга на теле однополостного гиперболоида, способного повысить производительность финишной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес.

Цель и задачи исследования. Целью данной работы является повышение производительности финишной обработки зубчатых колес за счет разработки новой технологии и схемы формообразования шлифовальных кругов.

Для достижения этой цели, в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить анализ литературы и установить степень проработанности вопроса финишной обработки зубьев цилиндрических зубчатых колес.
2. Разработать новую конструкцию шлифовального круга, позволяющую повысить производительность и снизить себестоимость изготовления цилиндрических зубчатых колес.
3. Разработать математическую модель формообразования гиперболоидного шлифовального круга на теле однополостного гиперболоида, имеющего непрерывное станочное зацепление с цилиндрическим зубчатым колесом.
4. Исследовать существование теоретической производящей поверхности инструмента на теле однополостного гиперболоида для формообразования зубьев цилиндрических зубчатых колес.
5. Исследовать, при помощи построенной компьютерной модели гиперболоидного шлифовального круга, погрешности формы зуба обрабатываемого цилиндрического зубчатого колеса.
6. Разработать рекомендации для применения предложенной технологии и инструмента к шлифованию цилиндрических зубчатых колес различных диаметров и с различной шириной зубчатого венца.
7. Экспериментально проверить практическую возможность реализации предложенной технологии формообразования теоретической поверхности гиперболоидного шлифовального инструмента, исследовать эксплуатационные характеристики инструмента при шлифовании зубьев цилиндрических зубчатых колес.

Объект исследования. Процесс финишной обработки зубчатых колес шлифовальными кругами, построенными на теле однополостного гиперболоида.

Предмет исследования. Связи и закономерности новой технологии формообразования шлифовальных кругов, предназначенных для повышения производительности финишной обработки зубчатых колес.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые получены математические зависимости для описания процесса профилирования червячного шлифовального круга, построенного на теле однополостного гиперboloида.

2. Впервые получены зависимости для определения отклонений формы поверхности зубьев цилиндрических зубчатых колес в процессе их шлифования гиперboloидным инструментом.

3. Впервые разработана схема формообразования цилиндрических зубчатых колес червячным гиперboloидным шлифовальным кругом.

4. Получила дальнейшее развитие теория формообразования шлифовальных кругов, как гиперboloидов огибающих эвольвентную поверхность зуба зубчатого колеса.

Практическая ценность полученных результатов.

1. Разработаны принципиально новые способы и технологии формообразования червячного гиперboloидного шлифовального круга на стандартном оборудовании за счет подачи инструмента вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперboloида, подтвержденные патентами на полезную модель № 77204 "Способ нарезания гиперboloидных зубчатых колес и инструментов" от 11.05.2012 г. и № 84382 "Способ нарезания гиперboloидных зубчатых колес и инструментов" от 08.02.2013 г.

2. Экспериментально подтверждена возможность создания червячной инструментальной поверхности на теле однополостного гиперboloида, сопрягаемой с цилиндрическими зубчатыми колесами разной геометрии.

3. Установлены границы работоспособности червячного гиперboloидного шлифовального круга.

4. Результаты работы внедрены на ЧАО «НПЦ «ТРАНСМАШ» г. Луганск и ПАО «Лугансктепловоз» г. Луганск.

5. Результаты работы внедрены в учебный процесс Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля" в курсе "Основы проектирования режущих инструментов", который читается для студентов института инженерной механики.

Методы и методология исследования.

Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: основные положения технологии машиностроения, положения теории резания; методы и принципы функционально-ориентированных технологий машиностроения; методы математического и компьютерного моделирования. Экспериментальные исследования проводились с

использованием современного оборудования и вычислительной техники; обработка результатов экспериментов проводилась при помощи статистических методов.

Положения, выносимые на защиту.

– Формообразование эвольвентного профиля зуба зубчатого колеса в его станочном зацеплении с гиперболоидным шлифовальным кругом.

– Аналитическая модель теоретической исходной инструментальной поверхности, предназначенной для формообразования зубьев цилиндрических зубчатых колес.

– Непрерывное станочное зацепление гиперболоидного шлифовального круга с зубчатым колесом любой геометрии.

Степень достоверности результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректностью применения современного математического аппарата и научных теорий, адекватностью разработанных математических и компьютерных моделей, применением современного оборудования; сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, внедрением результатов исследования в производство.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследования, которые представлены в диссертации, были представлены и обсуждены на семи научно-технических конференциях: на IX Международной научно-технической конференции "Тяжелое машиностроение. Проблемы и перспективы развития" (г. Краматорск, Украина, 2011 г.), на II-ой Международной научно-технической конференции "Прогрессивные технологии в машиностроении" (г. Львов, Украина, 2014 г.), на IV-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Проблемы глобализации и модели устойчивого развития экономики" (г. Луганск, ЛНР, 2014 г.), на III-й Региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные информационные, приборные и электротехнические комплексы" (г. Луганск, ЛНР, 2015 г.), на I Республиканской научно-практической Интернет-конференции студентов и молодых ученых с международным участием "Информационные технологии в экономике" (г. Луганск, ЛНР, 2017 г.), на IX Международной научной конференции "Техноконгресс" (г. Кемерово, Россия, 2017 г.), на I Международной научно-практической конференции "Современная наука: проблемы и перспективы" (г. Ставрополь, Россия, 2017 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на совместном заседании кафедр "Технология машиностроения и инженерный консалтинг" и "Станки, инструменты и инженерная графика" Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Луганской Народной Республики "Луганский национальный университет имени Владимира Даля" в 2017 г. в городе Луганске и на расширенном семинаре кафедры "Технология

машиностроения" Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования "Донецкий национальный технический университет" в 2017 г. в городе Донецке.

По результатам работы опубликовано 15 научных работ, из них 5 статей в специализированных изданиях, утвержденных ВАК, 3 статьи в изданиях, имеющих индексацию, 5 тезисов докладов на научно-технических конференциях, 2 патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 108 наименования и приложения с исходным кодом программы и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 40 рисунков и 9 таблиц. Общий объем работы – 157 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе "Анализ методов повышения долговечности зубчатых колес" выполнен анализ современного состояния вопроса финишной обработки боковых поверхностей зубьев цилиндрических колес. На основании выполненных исследований поставлены цель и основные задачи диссертационной работы.

Анализ литературных источников, посвященных финишной обработке зубьев цилиндрических зубчатых колес показал существование двух параллельных направлений исследования. Основной целью первого направления исследования является повышение точности и качества финишной обработки зубчатой поверхности в ущерб производительности процесса. Такие технологии применяются при производстве высокоточных зубчатых колес для отраслей приборостроения, автомобилестроения и авиационной промышленности. Вторым важным направлением исследований является повышение производительности технологических операций с целью наращивания объемов производства и сокращения себестоимости продукции. Поэтому, представляет интерес анализ влияния повышения производительности финишной обработки зубьев зубчатых колес на их качество и точность.

Существующие исследования и разработки позволили определить, что непрерывное обкатное шлифование червячным шлифовальным кругом является наиболее интересным для совершенствования, так как он обеспечивает наибольшую производительность обработки и практически исключает погрешность шага. Основные формы червячных шлифовальных кругов, применяемые на производствах, представляют собой цилиндрическую и квазигиперболоидную винтовые поверхности.

Проведенный анализ позволил выделить процесс финишной обработки зубьев зубчатых колес, а именно непрерывное шлифование червячными шлифовальными кругами, как один из процессов, влияющих на качество

получаемого зубчатого колеса и обладающий сравнительно невысокой производительностью. Повышение производительности процесса шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес позволит сократить время производства зубчатого колеса, что снизит затраты на изготовление, а, следовательно, и их себестоимость.

Во втором разделе диссертационной работы **"Теоретическое определение профиля многозаходного гиперболоидного шлифовального круга"** предложена схема формообразования гиперболоидной винтовой поверхности, способной зацепляться в непрерывном станочном зацеплении с цилиндрическим зубчатым колесом с произвольным количеством зубьев.

Рассмотрим произвольное цилиндрическое прямозубое зубчатое колесо 3 с модулем m и числом зубьев Z_1 или зубчатую рейку 2 (рис. 1). Будем вращать это колесо и заготовку имеющую форму однополостного гиперболоида 1 вокруг своих осей (перекрещивающихся под углом γ) с постоянными согласованными угловыми скоростями $\vec{\omega}_1$ и $\vec{\omega}_2$. Добавим относительную подачу исходного зубчатого колеса \vec{S}_1 вдоль оси ox .

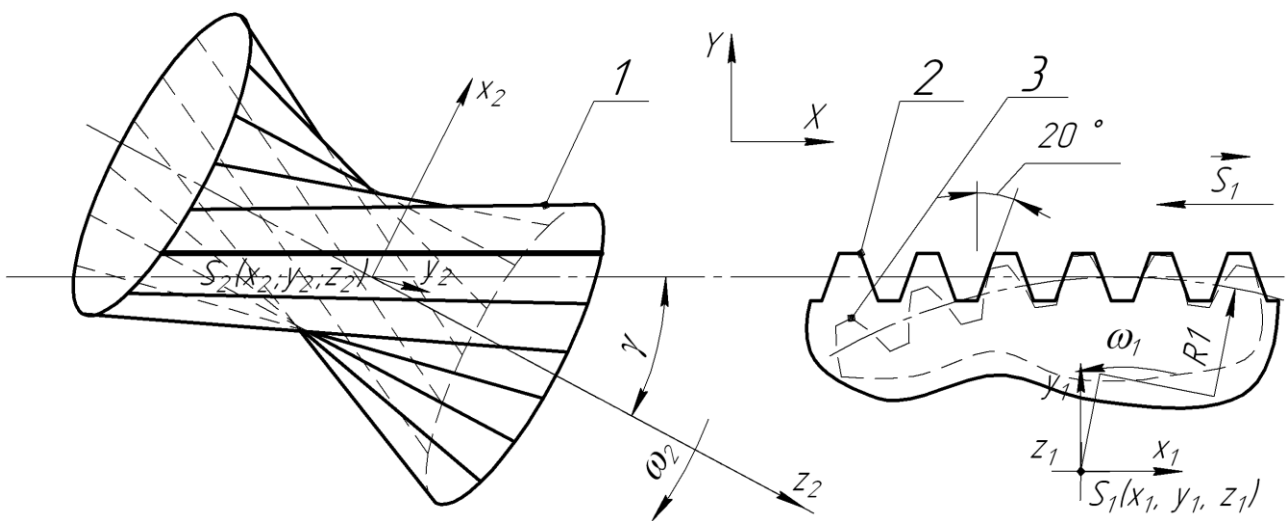


Рисунок 1. Схема формообразования гиперболоидной винтовой поверхности

Полученный в результате зацепления инструмент представляет собой винтовую зубчатую поверхность на теле однополостного гиперболоида, а прямая, вдоль которой велась подача исходного зубчатого колеса \vec{S}_1 , представляет собой прямолинейную образующую однополостного гиперболоида.

Для получения математической модели винтовой поверхности на теле однополостного гиперболоида найдем соответствие любой его точки, точке исходного зубчатого колеса. Учитывается, что исходное зубчатое колесо может быть преобразовано в исходную зубчатую рейку, а, следовательно, эвольвентный профиль зуба зубчатого колеса – в прямую с углом 20° . В этом

случае вращение цилиндрического зубчатого колеса заменяется дополнительным поступательным движением вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперboloида.

Построим схему перехода от исходного зубчатого колеса (зубчатой рейки) к получаемому инструменту, составим матрицы элементарных переходов, и применив матричный метод, получим систему уравнений описывающих семейство поверхностей, огибающих зубчатую поверхность. Дополнив систему четвертым уравнением, которое является уравнением непрерывности станочного зацепления, получаем искомую систему уравнений, которая описывает поверхность гиперboloидного шлифовального круга:

$$\begin{cases} x_2 = \cos\varphi_2(z_1\sin\gamma + S_1\cos\gamma) + y_1(-\sin\varphi_1\cos\varphi_2\cos\gamma - \cos\varphi_1\sin\varphi_2) + \\ + x_1(\cos\varphi_1\cos\varphi_2\cos\gamma - \sin\varphi_1\sin\varphi_2) - A\sin\varphi_2, \\ y_2 = \sin\varphi_2(z_1\sin\gamma + S_1\cos\gamma) + y_1(\cos\varphi_1\cos\varphi_2 - \sin\varphi_1\sin\varphi_2\cos\gamma) + \\ + x_1(\cos\varphi_1\sin\varphi_2\cos\gamma + \sin\varphi_1\cos\varphi_2) + A\cos\varphi_2, \\ z_2 = -S_1\sin\gamma + z_1\cos\gamma + \sin\varphi_1y_1\sin\gamma - \cos\varphi_1x_1\sin\gamma, \\ u_{21}z_1x'_1(\sin\varphi_1\sin\gamma + u_{21}S_1\sin\varphi_1\cos\gamma + y_1(u_{21}\cos\gamma - 1) - u_{21}A\cos\varphi_1\cos\gamma) + \\ + y'_1(u_{21}(z_1\cos\varphi_1\sin\gamma + S_1\cos\varphi_1\cos\gamma + A\sin\varphi_1\cos\gamma) + x_1(1 - u_{21}\cos\gamma)) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где: x_1, y_1, z_1 – координаты некоторой точки T_1 в системе координат исходного зубчатого колеса; x_2, y_2, z_2 – координаты точки T_1 в системе координат однополостного гиперboloида; φ_1 – угол поворота исходного зубчатого колеса вокруг оси z_1 ; φ_2 – угол поворота однополостного гиперboloида вокруг оси z_2 ; S_1 – величина подачи зубчатого колеса вдоль прямолинейной образующей однополостного гиперboloида; A – кратчайшее межосевое расстояние; γ – угол скрещивания осей; u_{21} – величина отношения угловой скорости вращения однополостного гиперboloида к угловой скорости вращения исходного зубчатого колеса; x'_1, y'_1 – первые производные траектории развертки эвольвенты.

Нахождение теоретической поверхности гиперboloидного шлифовального инструмента при помощи системы математических уравнений позволяет провести моделирование процесса формообразования.

В третьем разделе "Построение модели гиперboloидного шлифовального круга" разработана компьютерная программа на языке C++, позволяющая получить компьютерную модель гиперboloидного инструмента, способного обрабатывать зубья цилиндрического зубчатого колеса модуля m , и графически представить ее.

При построении модели зацепления искомого инструмента с заготовкой в работе рассматривается зацепление шлифовального круга с зубчатой рейкой.

Исходные данные для построения модели можно задавать двумя вариантами в зависимости от цели моделирования. В первом варианте фиксируем угол скрещивания осей γ , во втором – фиксируем делительный диаметр гиперboloидного инструмента в горловом сечении d_2^i . В обоих вариантах общими данными являются: m – модуль зуба цилиндрического зубчатого колеса (зубчатой рейки); Z_2 – число зубьев гиперboloидного шлифовального круга (оно же число заходов гиперboloидного червяка).

На рисунке 2 изображен только один заход из возможных Z_2 числа заходов для упрощения визуального восприятия, поэтому начиная с нулевой высоты и совершая один полный оборот гиперboloидная спираль попадает в Z_2 -ой зубец зубчатой рейки. Второй и остальные заходы гиперboloидной модели для многозаходного червяка получаются поворотом модели на угол $\alpha_2^{i-\text{го захода}} = 360^\circ \cdot i / Z_2$, где i – номер захода изменяющийся от 2 до Z_2

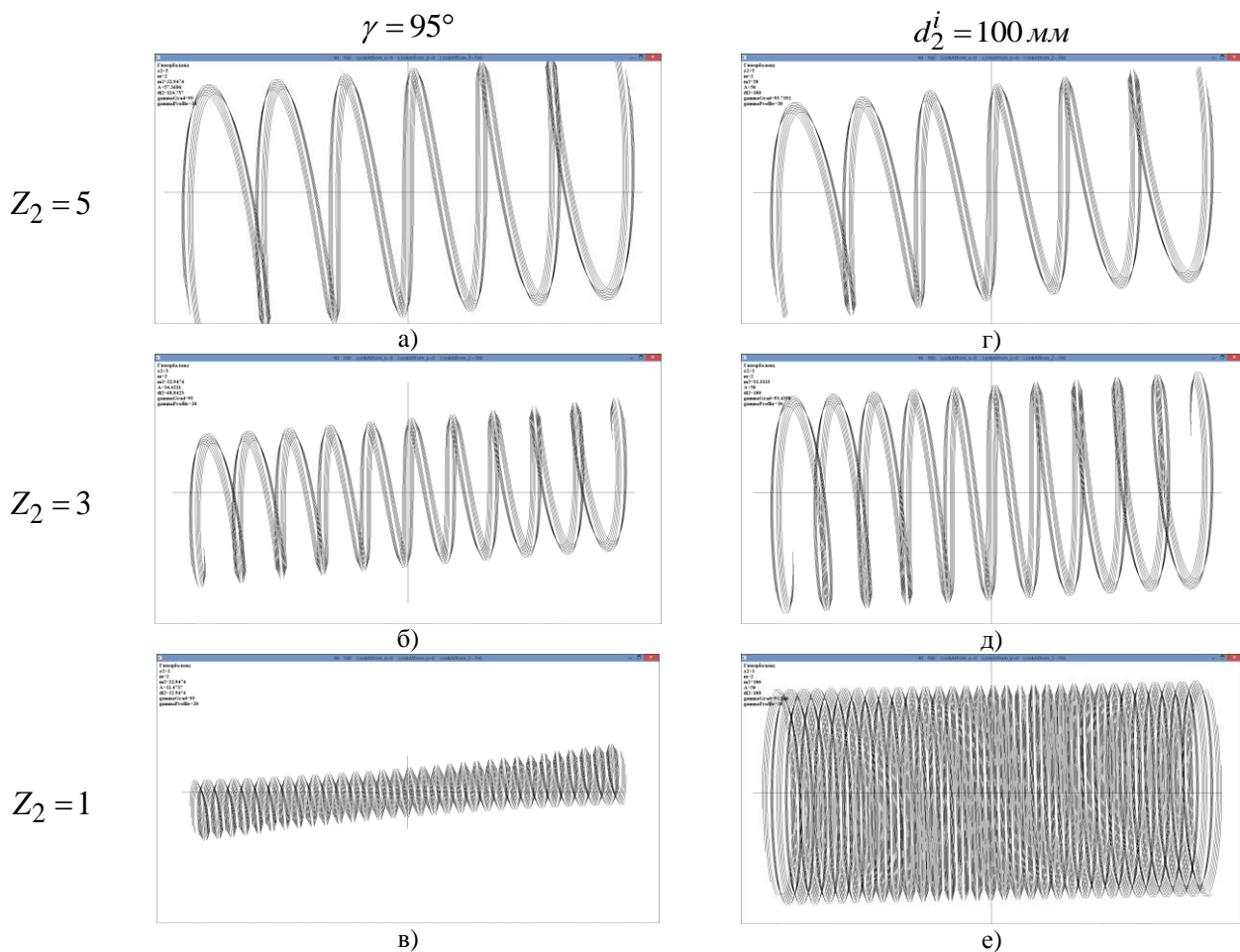


Рисунок 2. Модели гиперboloидного шлифовального круга с различным числом заходов Z_2 , вид сверху:

а), б), в) при постоянном угле скрещивания осей $\gamma = 95^\circ$; г), д), е) при фиксированном диаметре в горловом сечении гиперboloида $d_2^i = 100 \text{ мм}$

Используя полученные данные в виде трехмерной компьютерной модели, построенной на основании математической системы уравнений (1), можно утверждать о существовании червячной гиперboloидной поверхности, способной зацепляться в непрерывном станочном зацеплении с цилиндрическими зубчатыми колесами модуля m и произвольным числом зубьев Z_1 .

В четвертом разделе "Определение точности профиля гиперboloидного шлифовального круга, образованного винтовой производящей поверхностью" предложены схемы формообразования зубчатой поверхности цилиндрического зубчатого колеса гиперboloидным шлифовальным кругом и получаемая при этом точность финишной обработки.

Особенность применения гиперboloидного шлифовального круга – использование его по схеме формообразования не совпадающей со схемой формообразования самого круга. В схеме формообразования гиперboloидной винтовой поверхности (рис. 1) зубчатая рейка не имеет толщины, а, следовательно, по такой схеме невозможно обрабатывать полную ширину зубчатого венца колеса. Схема формообразования цилиндрического зубчатого колеса, реализующая такую возможность, показана на рисунке 3. На рисунке видно зацепление гиперboloидного шлифовального круга 1 с зубчатой рейкой 2 и цилиндрическим зубчатым колесом 3.

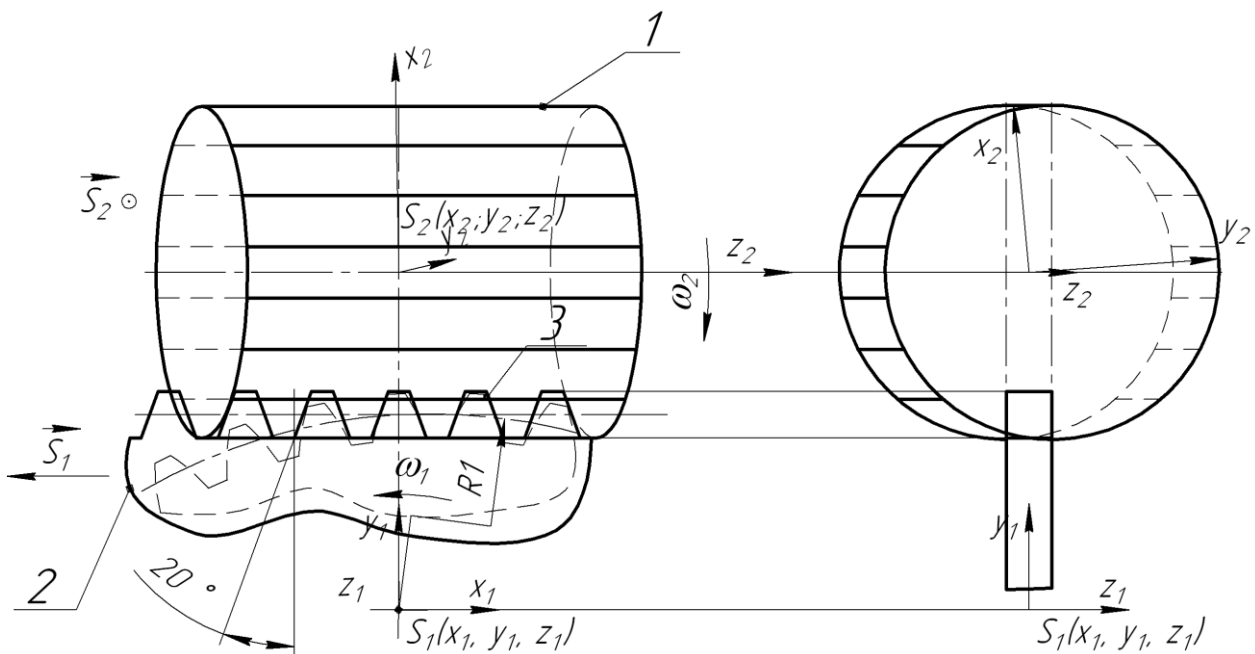


Рисунок 3. Схема формообразования цилиндрического зубчатого колеса гиперboloидным шлифовальным кругом

Изучение искажений профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса при его обработке по схеме, изображенной на рисунке 3, произведено при помощи усовершенствованной модели, в которую добавлено понятие секущих

плоскостей, параллельных плоскости зубчатой рейки x_1Oy_1 . Это позволяет учесть влияние винтового свойства поверхности витка червячного инструмента при смещении от начального сечения. Благодаря секущим плоскостям видно взаимное расположение точек поверхности червячного шлифовального инструмента и боковых поверхностей зубьев шлифуемой детали в различных сечениях. На рисунке 4 показано 40 образующих поверхности витка гиперboloидного инструмента. Наложение секущих плоскостей, параллельных плоскости рисунка, позволяет определить точки контакта гиперboloидного шлифовального круга и зубчатой рейки, а также отслеживать искажение эвольвентного профиля обрабатываемого зуба. Визуально точки контакта определяются в виде утолщения линии профиля зуба к вершине.

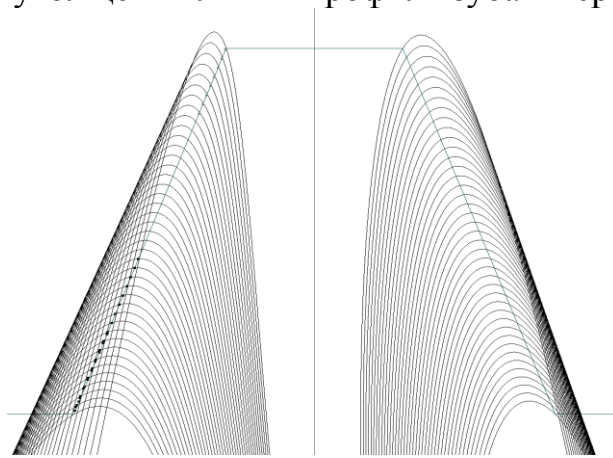


Рисунок 4. Точки контакта гиперboloидного шлифовального круга и зубчатой рейки, спроецированные на плоскость $z_1 = 0$

Измеренные величины искажений профиля вдоль высоты первого зуба зубчатой рейки показаны на графике рисунка 5 утолщенной линией. Меньшее искажение приходится на район делительной прямой зубчатой рейки и возрастает к основанию и головке зуба. Для сравнения искажения аналогичное исследование было проведено для обработки зубчатой рейки конволютным и архимедовым червячными шлифовальными кругами и показано на графике тонкими линиями.

Гиперboloидный шлифовальный круг по сравнению с цилиндрическим имеет намного более сложную пространственную форму, в результате чего при увеличении смещения зубчатой рейки тот же самый зуб будет получать большие искажения по сравнению с теми, что он получает находясь в горловом сечении гиперboloида.

На рисунке 6 показан график величин искажений профиля зуба зубчатой рейки гиперboloидным шлифовальным кругом для 1-го, 2-го и 3-го зуба, отсчитанных в положительную сторону оси ox .

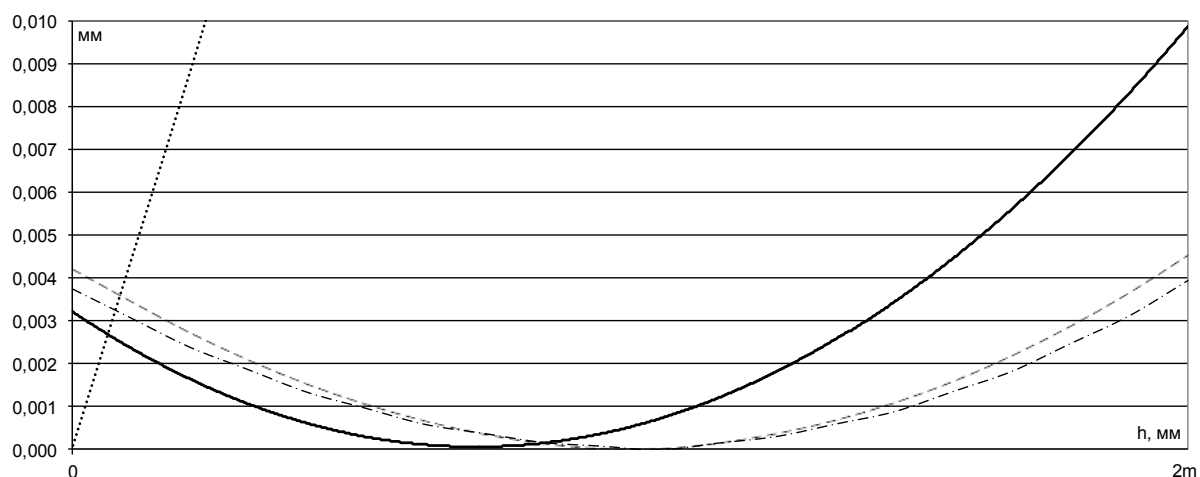


Рисунок 5. Форма искажения профиля зуба зубчатой рейки вдоль высоты зуба:

- обработка гиперболюидным шлифовальным кругом;
- обработка конволютным червячным шлифовальным кругом;
- обработка архимедовым червячным шлифовальным кругом;
- .-.- обработка архимедовым червячным шлифовальным кругом с измененным профилем в осевом сечении

Из графика видно нелинейное увеличение искажения профиля зуба зубчатой рейки с увеличением номера зуба, что говорит об ограниченной применимости предложенной схемы формообразования цилиндрического зубчатого колеса гиперболюидным шлифовальным кругом.

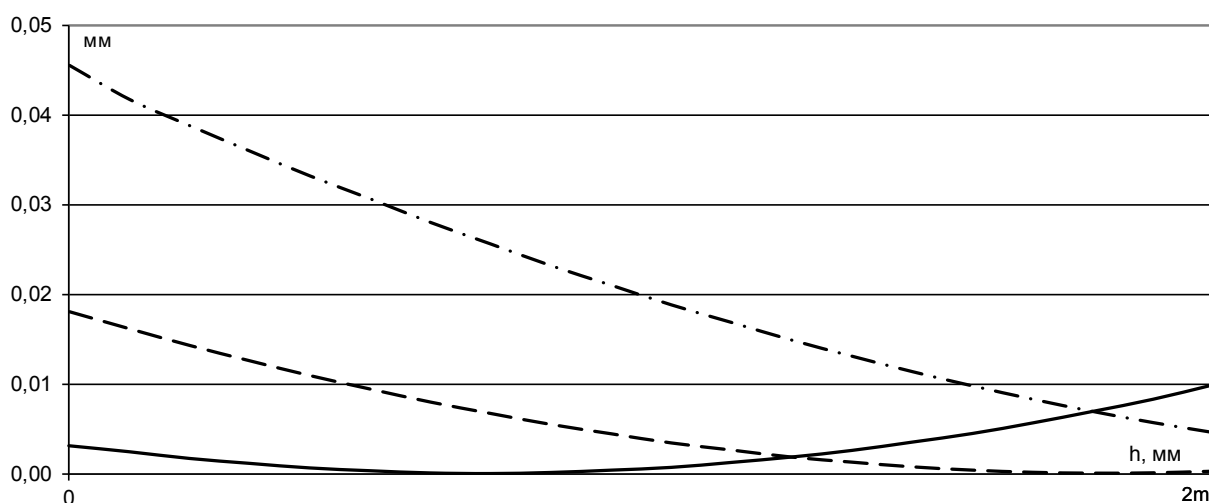
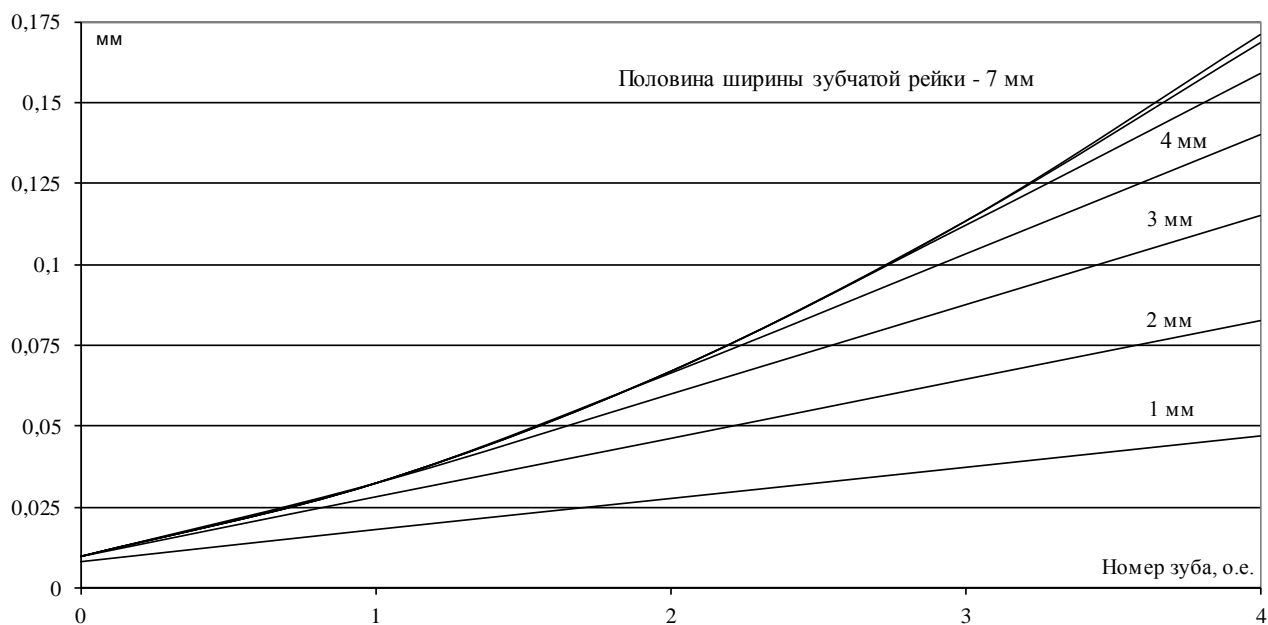


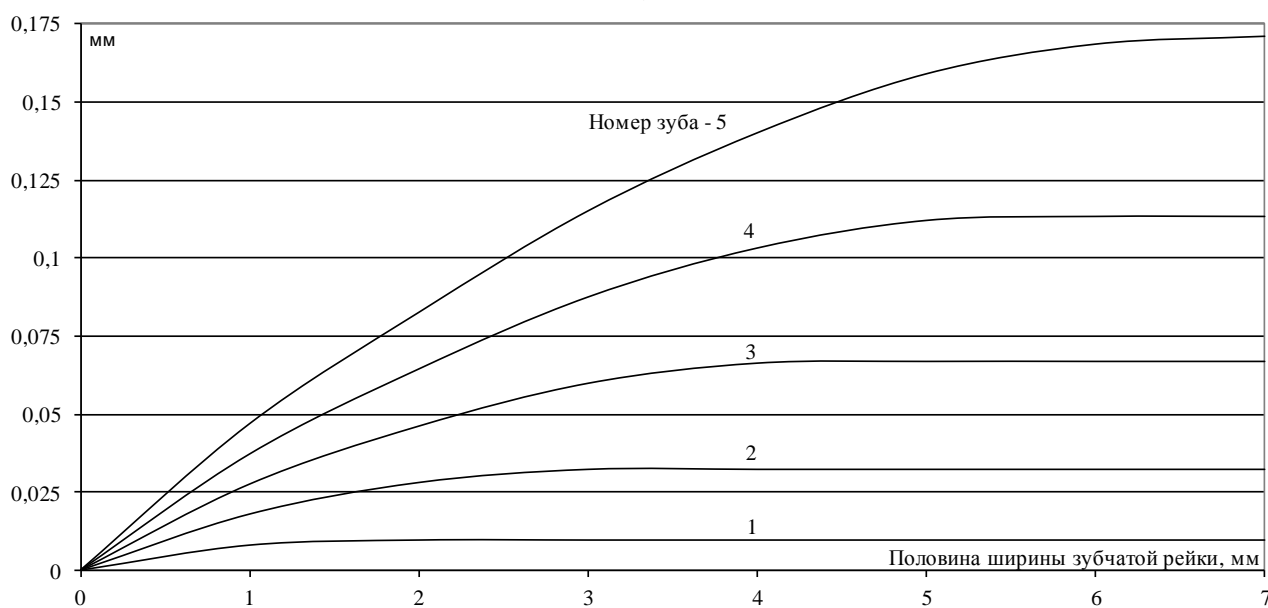
Рисунок 6. Искражение профиля зуба зубчатой рейки гиперболюидным шлифовальным кругом от номера зуба:

- первый зуб; ---- второй зуб; -.-.- третий зуб

В работе также исследована зависимость величины максимального искажения профиля зуба зубчатой рейки от номера зуба для различных значений толщины рейки (рис. 7).



а)



б)

Рисунок 7. Зависимость величины максимального искажения профиля зуба зубчатой рейки: а) от номера зуба; б) от половины ширины зубчатого колеса

Ряд проведенных исследований позволил определить приблизительное значение величины максимального отклонения боковой поверхности зуба зубчатой рейки от исходной эвольвентной формы:

$$\Delta = \frac{(0,0011x^2 + 0,0033x)(m \cdot \gamma^{\text{витка}})^2}{d_2^i}, \quad (2)$$

где $\gamma^{\text{витка}}$ – угол подъема витка, град; d_2^i – делительный диаметр в горловом сечении, мм; m – модуль зуба цилиндрического зубчатого колеса; x – расстояние вдоль оси X относительно горлового сечения гиперboloидного инструмента.

Заметим, что реальные зубчатые колеса не бесконечного диаметра, а, следовательно, выходят из зацепления раньше сильного искажения профиля зуба. Выведенный коэффициент перекрытия зубьев цилиндрического зубчатого колеса гиперboloидным шлифовальным кругом позволил определить уменьшение величины максимального искажения профиля зуба цилиндрического зубчатого колеса в зависимости от его количества зубьев Z_1 .

В пятом разделе "Экспериментальные исследования" разработана технология формообразования гиперboloидной инструментальной поверхности, описан процесс изготовления гиперboloидного шлифовального круга, а также разработана технология шлифования зубьев цилиндрического зубчатого колеса гиперboloидным шлифовальным кругом.

Разработана новая технологическая схема формообразования червячного шлифовального круга на серийном вертикально-фрезерном станке с делительной головкой. В процессе формообразования инструмент перемещается вдоль прямолинейной образующей однополосного гиперboloида. Витки шлифовального круга выкатываются, когда оси заготовки и инструмента находятся на скрещивающихся осях γ , а угловые скорости ω_1 и ω_2 обратно пропорциональны количеству зубцов гиперboloидного шлифовального круга и заготовки прямозубого долбяка.

На рисунке 8 показаны схемы формообразования витков шлифовального круга на поверхности однополостного гиперboloида прямозубым долбяком и прямобочным роликом, которые легли в основу патентов на полезную модель.

При накатке червячной гиперboloидной шлифовальной поверхности накатниками в виде прямобочных роликов, витки шлифовального круга выкатываются, когда ось прямобочного ролика параллельна прямолинейной образующей гиперboloидного шлифовального круга, а угловая скорость ω_2 согласована с поступательным движением подачи S вдоль прямолинейной образующей, при этом ролик может свободно вращаться вокруг своей оси.

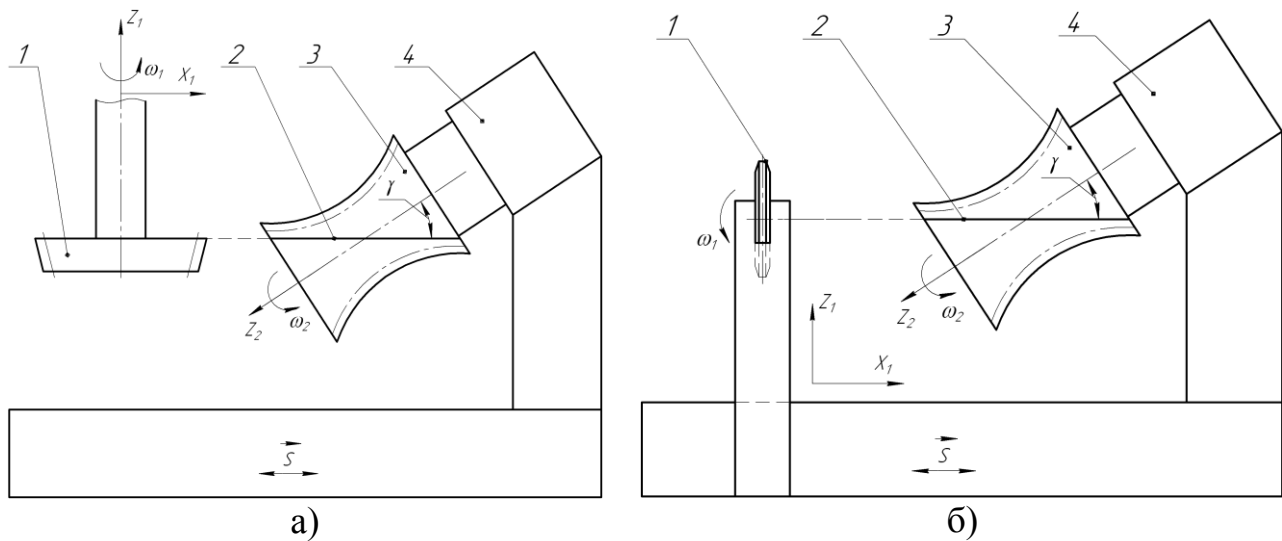


Рисунок 8. Схема формообразования витков шлифовального круга на поверхности однополостного гиперboloида:

а) прямозубым долбяком, б) прямобочным роликом.

1 – долбяк (а) или прямобочный ролик (б); 2 – прямолинейная образующая винтовой гиперboloидной поверхности; 3 – гиперboloидная заготовка шлифовального круга; 4 – делительная головка

Метод формообразования накаткой прямобочным роликом рекомендуется для чернового этапа формообразования инструмента, который будет подвергаться правке на зубошлифовальном станке. При черновом формообразовании гиперboloидной поверхности, показанной на рисунке 8б, стол, на котором закреплена делительная головка, должен совершать возвратно поступательные движения с ускоренной подачей S или на рабочей подаче. При обычном режиме обкатки при обратном движении стол совершает холостой ход на повышенной скорости, без зацепления заготовки с прямобочным роликом. В ускоренном режиме формообразования обкатка происходит и в прямом и в обратном направлении подачи стола S , при этом меняется направление вращения заготовки согласованное с направлением относительного перемещения прямобочного ролика вдоль прямолинейной образующей гиперboloидного шлифовального инструмента (рис. 9).

Операцию шлифования зубьев цилиндрического зубчатого колеса червячным шлифовальным кругом проводят по трем схемам: многопроходной (рис. 10а), одно- двухпроходной (рис. 10б), врезной (рис. 10в). При этом шлифуемое цилиндрическое зубчатое колесо 1 устанавливается на оправку 2 в центрах суппорта 3, который имеет вертикальное перемещение по

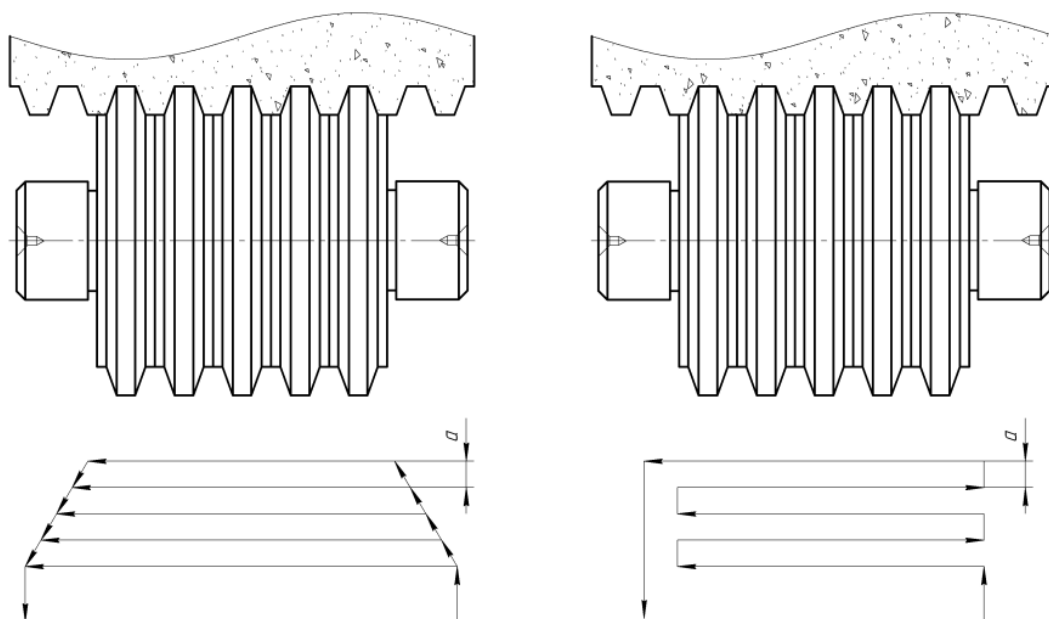


Рисунок 9. Схемы накатки червячной поверхности гиперболического шлифовального круга: а) односторонняя; б) двухсторонняя

направляющим стойки 4. Стойка имеет горизонтальное перемещение вдоль станины. Гитара деления зубошлифовального станка настраивается таким образом, чтобы за один оборот червячного гиперболического шлифовального круга 5 цилиндрическое зубчатое колесо 1 повернулось на количество зубьев равное числу заходов червяка Z_2 .

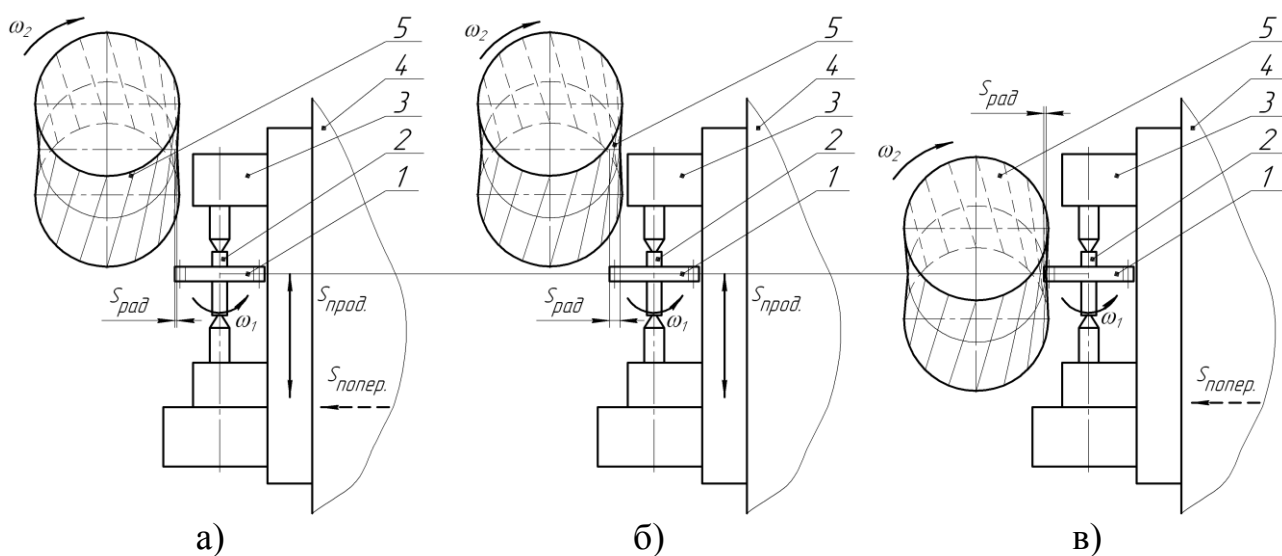


Рисунок 10. Схема шлифования червячным гиперболическим шлифовальным кругом: а – многопроходная; б – односторонняя; в – врезанием

Согласно схеме шлифования, изображенной на рисунке 10а, суппорт с заготовкой, совершая возвратно-поступательные движения, получает радиальную подачу на один шаг за один проход заготовки и инструмента. Количество проходов суппорта зависит от припуска на обрабатываемом зубчатом колесе.

Схема шлифования зубьев цилиндрического зубчатого колеса червячным гиперboloидным шлифовальным кругом, представленная на рисунке 10б, предусматривает шлифование полной высоты зуба за один-два прохода в зависимости от модуля зуба зубчатого колеса. При такой схеме зубошлифования необходимо учитывать увеличившуюся силу резания и больший объем снимаемого материала. Для снижения тепловой нагрузки и повышения стойкостной наработки шлифовального круга между правками, рекомендуется снижать величину продольной подачи суппорта по сравнению со схемой рисунка 10а.

Схема шлифования врезанием червячного гиперboloидного шлифовального круга в цилиндрическое зубчатое колесо (рис. 10в) не предусматривает продольной подачи суппорта вдоль направляющих стойки, а осуществляется за счет поперечной подачи – радиального врезания. Данная схема не применима к широким цилиндрическим зубчатым колесам, однако для зубчатых колес сравнительно малой ширины по отношению к диаметру горлового сечения гиперboloидного шлифовального круга, дает значительный выигрыш в производительности.

Исходя из величин максимальных диаметров шлифовальных кругов, применяемых на станках "Reishauer" и "Комсомолец", в качестве заготовки для изготовления гиперboloидного шлифовального круга был выбран серийный шлифовальный круг прямого профиля ПП 350х40х127 25А 40 СМ Волжского абразивного завода ГОСТ Р 52781-2007. Выведенные в работе закономерности позволили определить характеристики гиперboloидного круга максимально возможного диаметра в горловом сечении. Приняв величину модуля зуба зубчатого колеса $m=1,5$ и зная величину наружного диаметра шлифовального круга $d_2^{\max}=350$ мм, максимальную высоту получаемого гиперboloида $z_2^{\max} = B/2 = 40/2 = 20$ мм, получаем величину диаметра шлифовального круга в горловом сечении $d_2^{ia} = 346$ мм. Величины углов скрещивания осей γ и подъема витка $\gamma^{\text{витка}}$:

$$\gamma = 180^\circ - \arccos\left(\frac{m}{m_2}\right) = 180^\circ - \arccos\left(\frac{1,5}{346}\right) = 90,3^\circ, \quad (3)$$

$$\gamma^{\text{витка}} = \gamma - 90^\circ = 90,3^\circ - 90^\circ = 0,3^\circ, \quad (4)$$

где γ – угол скрещивания осей; $\gamma^{\text{витка}}$ – угол подъема витка гиперboloидного инструмента; m – модуль зуба цилиндрического зубчатого колеса; m_2 – модуль

зуба гиперболоидного шлифовального круга.

Изготовленный многозаходный гиперболоидный шлифовальный круг, прямозубым зуборезным хвостовым долбяком M1.5xZ20 на вертикально-фрезерном станке, показан на рисунке 11.

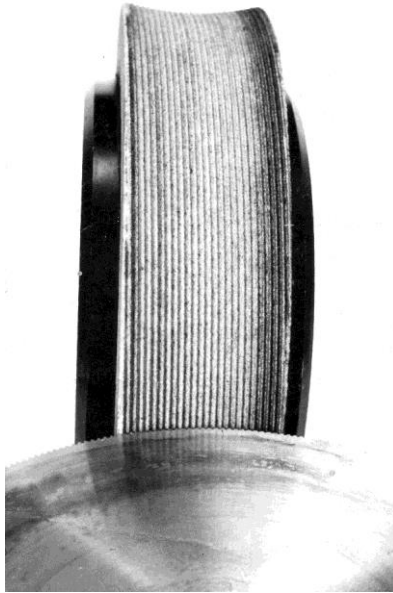


Рисунок 11. Многозаходный гиперболоидный шлифовальный круг

Шлифование зубьев цилиндрических зубчатых колес производилось при максимальном числе оборотов шлифовального шпинделя зубошлифовального станка 1900 об/мин. Минимальная скорость обработки при шлифовании зуба цилиндрического зубчатого колеса рассчитывается исходя из минимального диаметра гиперболоидного круга в горловом сечении. Она составляет $V=29,3$ м/с, что соответствует скорости шлифования (25-35 м/с).

Испытание изготовленного шлифовального круга при шлифовании цилиндрических зубчатых колес показало, что отклонение экспериментально полученного профиля от теоретического не превышает 3-5%, что лежит в пределах допуска.

Экспериментальные исследования показали, что повышение производительности при использовании 3-х и 7-ми заходных червячных гиперболоидных кругов составило 30% и 60% соответственно.

При помощи разработанных 3-х и 7-ми заходных гиперболоидных шлифовальных кругов шлифовались зубья цилиндрических зубчатых колес с числом зубьев $Z_1 = 40, 50, 99$. Исследование отклонений величины межцентрового расстояния и толщины обработанных зубьев, показало, что точность таких колес соответствует 6-ой степени точности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненная диссертационная работа посвящена решению важной народнохозяйственной задачи, направленной на повышение производительности процесса шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес за счет новой конструкции и технологии формообразования многозаходных шлифовальных кругов. Полученные в работе результаты позволили решить следующие вопросы:

1. Разработана новая технологическая схема формообразования шлифовального круга, позволившая усовершенствовать технологию его изготовления, что привело к повышению производительности шлифования зубьев цилиндрических зубчатых колес.

2. Разработана математическая модель формообразования гиперboloидного шлифовального круга на однополостном гиперboloиде, который имеет непрерывное станочное зацепление с цилиндрическими зубчатыми колесами любой геометрии.

3. Аналитически подтверждено существование теоретической производящей поверхности инструмента на однополостном гиперboloиде.

4. В аналитическом виде, в пространственном станочном зацеплении, получены поверхности зубьев на гиперboloидной инструментальной поверхности, являющейся производящей поверхностью многозаходного шлифовального круга.

5. Построена компьютерная модель многозаходного гиперboloидного шлифовального круга, сопряженная с поверхностью зубьев обрабатываемых зубчатых колес.

6. Получена возможность при помощи компьютерной модели проводить моделирование гиперboloидного шлифовального круга с необходимой точностью и исследовать процесс его зацепления с цилиндрическим зубчатым колесом.

7. Аналитически найдены зависимости, позволяющие оценить точность финишной обработки цилиндрических зубчатых колес, при помощи разработанного инструмента и сопоставить с существующими технологиями отделочной обработки.

8. Разработаны рекомендации, позволяющие определить параметры шлифовального круга в зависимости от геометрии обрабатываемого зубчатого колеса и схемы его формообразования.

9. Проведено экспериментальное формообразование многозаходных шлифовальных кругов, внедрены в производство разработанный инструмент и технологии шлифования зубьев. Это позволило повысить производительность шлифования зубьев на 30%, и получить зубья соответствующие 6-й степени точности.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в рецензируемых журналах и изданиях

1. Витренко, В.А. Вопросы формообразования винтовых зубчатых колес / В.А. Витренко, **А.Э. Воронов**, М.А. Кашура, М.Н. Кузнецова // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. праць. Вип. 28. — Краматорськ: ДДМА, 2011. — С. 142–144. *(Предложена технология формообразования винтовой зубчатой передачи второго рода цилиндрического и гиперболоидного зубчатых колес на скрещающихся осях).*

2. **Воронов, А.Э.** Нарезание зубьев на гиперболоидной поверхности / **А.Э. Воронов**, В.А. Витренко // Наукові праці Донецького національного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 9(205). — Донецьк: ДВНЗ ДНТУ, 2012. — С. 242–246. *(Разработана схема формообразования гиперболоидной винтовой поверхности при помощи зубчатой рейки).*

3. **Воронов, А.Э.** Компьютерное моделирование процесса формообразования гиперболоидного інструмента / **А.Э. Воронов**, В.А. Витренко // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні – 2012. — №746. — С. 13–17. *(Получена математическая модель гиперболоидного червячного инструмента).*

4. **Воронов, А.Э.** Методика определения оптимальных параметров инструмента гиперболоидной формы // Наукові праці Донецького національного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 1(10)'2013. — Донецьк: ТОВ "Цифрова типографія", 2013. — С. 92–99. *(Подобрано програмное обеспечение и составлены алгоритмы программы для компьютерного моделирования гиперболоидного червячного инструмента).*

5. **Воронов, А.Э.** Аналіз спотворення профілю зуба циліндричного зубчастого колеса гіперболоїдним шліфувальним колом засобами комп'ютерного моделювання // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні – 2013. — №772. — С. 114–119. *(Получены компьютерные модели многозаходных гиперболоидных червячных шлифовальных кругов).*

6. **Воронов, А.Э.** Определение оптимальных параметров инструмента гиперболоидной формы средствами компьютерного моделирования // Вестник Луганского национального университета имени Владимира Даля №1(3) Ч.2. — Луганск: Изд-во ЛНУ им. В. Даля, 2017. — С. 44-49. *(Найдена зависимость максимального искажения профиля зуба зубчатого колеса от эвольвентного при его обработке многозаходным гиперболоидным шлифовальным кругом).*

Патенты

7. Патент на полезную модель №77204. Способ нарезания гиперболоидных зубчатых колес и инструментов. Зарегистрировано в Государственном реестре патентов Украины на полезные модели 11.02.2013, бил. № 3/2013. *(Предложен способ получения гиперболоидной винтовой поверхности на серийном вертикально-фрезерном станке с делительной головкой).*

8. Патент на полезную модель №84382. Способ нарезания гиперболоидных зубчатых колес и инструментов. Зарегистрировано в Государственном реестре патентов Украины на полезные модели 25.10.2013, бил. № 20/2013. *(Предложен*

способ получения гиперboloидной винтовой поверхности на серийном вертикально-фрезерном станке с делительной головкой при помощи прямозубого долбяка).

Научные работы в материалах конференций

9. Витренко, В.А. Развитие формообразования зубчатых колес путем создания нового инструмента / В.А. Витренко, **А.Э. Воронов**, М.Н. Кузнецова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку: матеріали ІХ Міжнарод. наук.-техн. конф., 2011 р. — Краматорськ: ДДМА, 2011. — С. 25. *(Рассмотрено влияние схем формообразования зубчатых колес на производительность процесса обработки).*

10. **Воронов, А.Е.** Комп'ютерне моделювання зачеплення гіперболоїдної й циліндричної поверхонь // Прогресивні технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць ІІ-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2014 р. — Львів. — С. 18. *(Предложено программное обеспечение для проведения компьютерного моделирования гиперboloидной винтовой поверхности).*

11. **Воронов, А.Э.** Моделирование новых форм инструментов для машиностроительной промышленности // Проблеми глобалізації та моделі сталого розвитку економіки: Матеріали ІV-ої Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених, — Луганськ, 2014. — С. 192–194. *(Разработана модель определения оптимальных параметров гиперboloидных инструментов по их трехмерным компьютерным моделям).*

12. **Воронов, А.Э.** Моделирование непрерывного станочного зацепления цилиндрического зубчатого колеса и винтовой гиперboloидной поверхности // Сборник тезисов докладов Четвертой региональной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых "Современные информационные, приборные и электротехнические комплексы", 22-23 апреля 2015 г., г. Луганск, факультет электротехнических систем, ЛГУ им. В. Даля. — Изд-во "Ноулидж": Луганск. — 2015. — С. 21–23. *(Получены результаты моделирования многозаходного гиперboloидного шлифовального круга).*

13. **Воронов, А.Э.** Повышение производительности финишной обработки цилиндрических зубчатых колес // Информационные технологии в экономике: Материалы І Республіканської науково-практичної Інтернет-конференції студентів і молодих учених з міжнародним участю [Електронне видання]. — Луганськ: Изд-во ЛНУ ім. В. Даля, 2017. — С. 253-255. *(Разработаны схемы шлифования цилиндрических зубчатых колес многозаходными червячными шлифовальными кругами).*

14. **Воронов, А.Э.** Технология производства червячных гиперboloидных шлифовальных кругов // Сборник статей студентов, аспирантов и профессорско-преподавательского состава. По результатам ІХ Международной научной конференции «Техноконгресс», — Кемерово, 2017. — С. 11–14. *(Разработаны схемы накатки червячной гиперboloидной поверхности шлифовального круга).*

15. **Воронов, А.Э.** Совершенствование процесса финишной обработки цилиндрических зубчатых колес за счет применения шлифовальных кругов гиперboloидной формы // Современная наука: проблемы и перспективы: сборник статей І Международной научно-практической конференции. — Ставрополь: Логос, 2017. — С. 11-17. *(Изготовлен многозаходный гиперboloидный шлифовальный круг).*