

Министерство образования и науки Российской Федерации
Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ)

На правах рукописи



Печенкин Михаил Владимирович

Многокоординатное формообразование фрезерованием зубьев
гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны

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

Диссертационная работа на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор

Лунев Александр Николаевич

Казань 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Глава 1. Состояние вопроса. Цели работы и задачи исследований.	
1.1. Конструктивные и технологические особенности зубьев зубчатых колес.	8
1.2. Методы формообразования сложно-профильных поверхностей резанием.	12
1.3. Особенности формообразования зубьев зубчатых колес.	19
1.4. Проектирование и производство гиперboloидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны	22
1.5. Применимость методов финишной обработки для формообразования зубьев на однополостном гиперboloиде вращения.	32
Выводы по главе. Цель работы и задачи исследования.	38
Глава 2. Моделирование направляющей линии и образующих линий при формообразовании боковой поверхности зубьев	41
2.1. Определение координат точек образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев.	42
2.2. Определение координат образующих линий при профильной модификации зубьев.	48
2.3. Геометрическое моделирование гиперboloидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны.	52
Выводы по главе	57
Глава 3. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев при пятикоординатной обработке на станках с ЧПУ.	58
3.1. Расчет геометрии формообразуемой поверхности зубьев при пятикоординатной обработке.	59

3.2. Определение ориентации инструмента при пятикоординатной обработке зубьев	66
Выводы по главе.	75
Глава 4. Технология и инструмент для формообразования зубьев	76
4.1. Разработка способа предварительного фрезерования зубьев модульными пальцевыми и дисковыми фрезами.	76
4.2. Оценочный расчет времени предварительного формообразования зубьев дисковой модульной фрезой на станках с ЧПУ.	82
4.3. Разработка инструмента для профильной модификации зубьев	85
4.4. Практическая реализация формообразования зубьев на станках с ЧПУ	89
4.5. Опробование и внедрение и результатов диссертационного исследования.	95
Выводы по главе.	97
Основные результаты и выводы по работе	98
Список литературы	100
Приложения	122

ВВЕДЕНИЕ

Развитие современной техники предъявляет непрерывно возрастающие требования к зубчатым передачам.

К существующим в настоящее время передачам со скрещивающимися осями относят: червячные, спироидные, гипоидные, винтовые цилиндрические и цилиндро-конические передачи.

В области передаточных чисел от 1 до 4 могут применяться винтовая цилиндрическая передача и цилиндро-коническая передача, однако они не подходят для применения в тяжело нагруженных приводах [81, 8].

Рекомендуемый диапазон передаточных чисел червячной и спироидной передачи находится в диапазоне 20-60. При уменьшении передаточного отношения резко возрастает опасность подрезания и заострения зубьев колеса и поднутрения и заострения витков червяка, а также уменьшается коэффициент перекрытия [22].

В механизмах, где требуется передавать большой крутящий момент при передаточных отношениях менее 10, в качестве силовой широко применяют гипоидную передачу. При этом в тяжело нагруженных приводах со скрещивающимися осями контактные давления боковой поверхности зубьев составляют не менее 1500-2000 МПа [46], а в ряде случаев доходят до 4000 МПа [107], что приводит к разрыву смазочной пленки, металлическому контакту трущихся поверхностей и огромным касательным напряжениям, превышающим предел, за которым наступает пластическое деформирование зубьев. [107,46].

Известно, что для силовых зубчатых передач главным критерием работоспособности является способность передавать рабочие нагрузки [174]. Потребность в передаче больших нагрузок при сохранении или снижении массы привода непрерывно возрастает.

Теоретические исследования зубчатых колес на основе однополостного гиперболоида вращения, выполненные в работах [109,123], показали, что

теоретический коэффициент перекрытия гиперболоидной зубчатой передачи с зубьями двойной кривизны оказывается значительно больше любой применяемой в настоящее время зубчатой передачи в области передаточных чисел 1-6.

Вопросы производства гиперболоидной зубчатой передачи с зубьями двойной кривизны были сведены в работе [109,110] лишь в некоторые указания. Попытки изготовления таких зубчатых колес, предпринятые в работах [123,17] не увенчались успехом из ограниченности формообразующих движений классических зубофрезерных станков. Технологические трудности изготовления таких зубчатых колес можно преодолеть только при многокоординатной обработке. Эффективно формообразовывать такие зубья возможно только при управлении ориентацией инструмента.

Таким образом, формообразование зубчатых колес на заготовке вида «однополостной гиперболоид вращения» на многокоординатных станках с ЧПУ является актуальной задачей.

В результате анализа литературных источников были сформулированы цели и задачи исследования.

Научная новизна работы заключается:

- в математической модели управления ориентацией фрезы при формообразовании боковой поверхности зуба гиперболоидного зубчатого колеса двойной переменной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ;
- в разработанной математической зависимости определения положения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев.

Практическая ценность работы заключается:

- в управляющей программе пятикоординатного фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны с использованием разработанной методики управления ориентацией фрезы.

- в способе предварительного фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес модульными дисковыми и пальцевыми фрезами и реализации его на многокоординатном станке с ЧПУ.
- в инструменте для профильной модификации зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны.
- в математических зависимостях для определения координат образующих линий зубьев, выполненных дугой окружности и эллипса.

Степень достоверности результатов и апробация работы.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на международных научных конференциях: Туполевские чтения, посвященной 1000-летию города Казани (Казань, 2005 г.), Рабочие процессы и технология двигателей (Казань, 2005 г.), XXXIII Гагаринские чтения» (Москва 2007 г.); Авиакосмические технологии и оборудование (г. Казань, 2014 г.), на заседании научно-технического совета ОАО «Зеленодольский завод имени А.М. Горького» в 2014 году.

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технологии машиностроительных производств» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, расширенном заседании кафедр «Технология машиностроения» и «Металлорежущие станки и инструменты» Ульяновского государственного технического университета.

Результаты диссертационного исследования внедрены и опробованы на ООО «АДЕМ-Центр» в качестве алгоритмов и математических зависимостей, используемых в CAD/CAM-системе ADEM для получения геометрических моделей и составления управляющих программ обработки зубьев на основе заготовки вида «однополостной гиперболоид вращения». В результате практического использования работы на ООО «АДЕМ-Центр» было опробовано чистовое фрезерование зубьев с использованием результатов диссертационного исследования, получено снижение времени чистовой

обработки зубьев на 12%. На АО «Вакууммаш» переданы для практического использования и опробованы результаты работы в части предварительного формообразования гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны. Было достигнуто снижение времени предварительной обработки боковой поверхности таких зубьев с 7 часов до 15 минут по сравнению с временем обработки концевой фрезой. Результаты исследования переданы ПАО «Камаз» для практического использования и опробованы в части создания опытных высоконагруженных зубчатых пар главной передачи грузового автомобиля по гранту между КНИТУ им. А.Н. Туполева (КАИ) и ПАО «Камаз» «Перспективные экологичные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат». Изготовлены опытные образцы зубчатых колес.

Личный вклад автора. Все экспериментальные и теоретические результаты получены автором лично. Участие соавтора Абзалова А.Р. в двух научных статьях носило консультативный характер.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, библиографии (192 литературных источника) и приложений. Объем диссертации – 132 страницы. В тексте 40 рисунков и 4 таблицы.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ» на кафедре технологии машиностроительных производств.

Глава 1.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ЦЕЛИ РАБОТЫ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.

1.1. Конструктивные и технологические особенности зубьев зубчатых колес.

Назначение зубчатых передач – передача вращения. Зубчатые колеса получили широчайшее распространение благодаря большей надежности, конструктивным особенностям, обеспечивающим меньшие габариты привода при высоком к.п.д., достигающим до 98%. Первые зубчатые колеса были деревянными и применялись в устройствах, передающих или преобразовывающих механическую энергию от природного источника, например, в оросительных устройствах, жерновах мельниц, насосах [155].

Вид поверхностей, описываемых мгновенной осью относительного движения зубчатых колес передачи, называемой ГОСТ 16530-83 [47] аксоидной поверхностью, подразделяет зубчатые передачи на цилиндрические, конические, гиперболоидные (рисунок. 1.1).

Зубчатые колеса содержат достаточно большое количество конструктивных элементов и особенностей их исполнения, что значительно расширяет их многообразие.

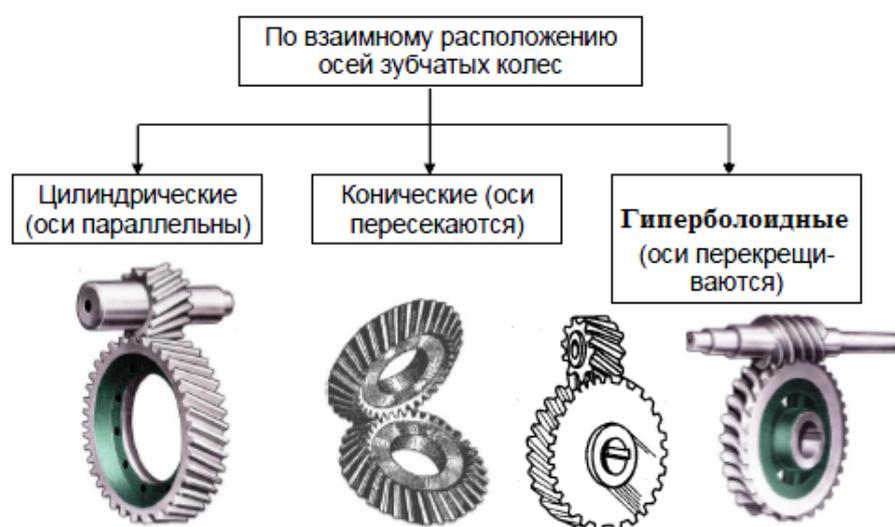


Рисунок 1.1. Классификация зубчатых передач по взаимному расположению осей зубчатых колес

Зуб зубчатого колеса состоит из головки и ножки зуба, а поверхностью, отделяющую головку зуба от его ножки, является делительная поверхность d .

Важнейшими элементами зубчатых колес, осуществляющих передачу вращения, являются профили зубьев [74].

О зубчатых колесах было известно еще в I веке до н.э.[15], однако теория зацепления профилей зубьев получает развитие только в конце 17 века.

Технологические преимущества эвольвентного зацепления в виде двух-трехкратного сокращения номенклатуры режущего инструмента вывело эту форму профилей зубчатых колес вперед.

Однако, у зубчатых колес с эвольвентным профилем зубьев есть и недостатки, связанные с высокой чувствительностью таких зубчатых колес к погрешностям изготовления и монтажа, необходимостью увеличения габаритов зубчатых колес для обеспечения контактной прочности [32], поэтому в 1950-х гг. дополнительно была предложена зубчатая передача с выпукло-вогнутой формой профиля зубьев, известная по работе [117].

Теоретически точное сопряжение любых профилей зубьев скорее недостаток, чем достоинство [93,181, 148].

Например, из-за погрешностей изготовления, сборки и деформации у теоретически точного сопряжения зубьев передач с параллельным расположением осей вращения зубчатых колес боковой зазор становится меньше допустимого, толщина слоя смазки значительно уменьшается и происходит интерференция в точке входа в зацепление [185]. В результате зубья передач с параллельным расположением осей вращения, зачастую, при выходе из зацепления заклинивают, и передача движения становится невозможной [137,57].

При выходе зуба из зацепления теоретически точных передач с параллельными осями расположения зубчатых колес в полюсе зацепления имеет место чистое качение – износа здесь почти не происходит, а в области вершины и основания зуба имеет место максимальное скольжение, поэтому износ здесь значительно выше [86].

Для компенсации будущих ошибок изготовления, сборки и деформации, оказывающих влияние на работу привода, на этапе изготовления зубчатых колес вносят искажение геометрии профиля зуба отклонением от главной поверхности, которое согласно ГОСТ 16530-83 [47] называется модификацией. ГОСТ 16530-83 [47] различает продольную модификацию (по линии зуба), профильную (по профилю зуба) и др. виды модификации.

Профильная модификация известна достаточно давно, одним из первых исследователей, предложивших модифицировать головку зубьев цилиндрических зубчатых колес в 1938 году, был Н. Walker [186].

Под профильной модификацией зубьев зубчатых колес понимают изменение геометрии зацепления, улучшающее реальный процесс зацепления и повышающее прочность элементов конструкции и надежность работы зубчатых передач [43].

Модификация зуба зубчатых передач с параллельными осями вращения по длине зуба снижает чувствительность передачи к погрешностям сборки, а по высоте смягчает взаимодействие зубьев в момент выхода одной пары из зацепления и входа другой [61, 164, 180, 182, 127].

Величины деформации при начале взаимодействия очередной пары зубьев могут превышать погрешность изготовления зубчатых колес [56], поэтому для зубчатых передач при модификации профиля зубьев необходимо учитывать и деформации элементов зубчатого колеса, так как их наличие «не позволяет исключить кромочный контакт даже при полном отсутствии погрешностей зубьев колес» [50].

Наиболее значительное влияние на величину динамической нагрузки и плавность работы прямозубой цилиндрической передачи с параллельным расположением осей вращения оказывает погрешность шага зацепления (f_{pb}), а погрешности профиля зубьев (f_{β}) приводят к так называемым обратным ударам, нарушающим плавность работы передачи [43].

Существуют как экспериментальные методы, так и теоретические методы определения величины модификации. Практический метод является

более точным, однако дорогостоящим и длительным, кроме того неправильный выбор модификации может приводить к разрушению не только редуктора, но и двигателя [62]. Снизить, либо полностью исключить дорогостоящие издержки при назначении рациональной формы модификации зубьев позволяет использование современных способов компьютерного проектирования и компьютерной имитации [59].

Известны различные формы модифицированных профилей зубьев. Как правило, профильная модификация сводится к замене участка боковой поверхности зуба прямой [178], эвольвентой [43] или кривой второго порядка [3,4,50,152,14,111,139,137,101]. Некоторые варианты зубьев с профильной модификацией приведены на рисунке 1.3.

В работе [146] было показано, что зубчатая передача с локализацией пятна контакта мало чувствительна к погрешностям изготовления и сборки.

При формообразовании зубьев зубчатых передач важно осуществлять модификацию зубьев [127,128] для компенсации погрешностей, имевших место при изготовлении, сборке и деформации зубчатого колеса под нагрузкой.

Незакругленная острая кромка зубьев без модификации может способствовать образованию на ножке смежного зуба лунок, что может сделать работу передачи непредсказуемой [136].

В работах [111,43,50] были приведены исходные контуры инструментальной рейки с компенсирующим предискажением режущей кромки инструмента в виде скругления режущей кромки по дуге окружности. Однако, такая форма режущих кромок требует осуществления дополнительного искривления режущей кромки фрезы. [97,182].

ГОСТ 13755-81 предусматривает модификацию исходного контура инструмента прямой линией в зависимости от модуля передачи.

Профильную модификацию осуществляют различными технологическими способами: за счет смещения профилирующей точки шлифовального круга на расчетную величину [84,160], внесением

предискажений режущих кромок инструмента [135,176,111]. Технологически проще внесение предискажений режущих кромок инструмента, работающего методом обката, так как профиль фрезы выполнен в виде прямолинейных участков, каждый из которых формирует на зубе колеса соответствующую эвольвенту [90]. Однако, переходный участок эвольвент, образованных таким инструментом, работает как острая кромка зуба. Сравнение показывает, что качественные характеристики с модификацией режущих кромок по дуге окружности выше, чем зубчатых колес, изготовленных инструментом с модификацией режущих кромок прямой линией, образующих модификацию зубьев по эвольвенте [43].

Иногда модификация выполняется и слесарным способом путем закругления кромок зубьев [137].

Продольную модификацию зубьев осуществляют различными технологическими методами: модификацией формообразующих движений станка с использованием модификатора эксцентрикового механизма обкатного движения станка [67,175], наклона оси изделия по отношению к оси шевера [66], изменением размера делительной поверхности инструмента [44,135] и другими методами.

Большая часть известных модифицированных профилей боковой поверхности зуба или инструмента содержат криволинейный профиль в виде дуг окружностей, иных кривых, что сдерживает их применение без соответствующего металлорежущего оборудования, которые можно преодолеть с использованием станков с ЧПУ [23].

1.2. Методы формообразования сложно-профильных поверхностей резанием.

Формообразование поверхностей резанием получило широкое распространение и применяется во всех отраслях промышленности.

Получение поверхностей сложной формы возможно различными технологическими способами.

К одним из первых трудов, посвященных резанию и кинематике формообразования, относят работу [48]. Грановским Г.И. были сформулированы две основных задачи кинематики резания металлов, одна из которых заключалась в анализе и классификации схем резания, а также определении очертания контура изделий, образуемых траекториями перемещения точек режущих кромок, предопределяемых кинематическими зависимостями инструмент-изделие и кинематическими схемами резания. К другой (второй) задаче кинематики резания Грановский Г.И. относил постановку определений геометрических параметров резания и состояния резания металлов. Им была введена классификация кинематических схем резания на группы, каждая из которых основывалась на сочетании двух простейших движений – прямолинейного и вращательного.

Вопросы способов формообразования исходных инструментальных поверхностей были подробно изложены в работе [144]. Родиным П.Р. было рассмотрено условие существования исходной инструментальной поверхности, а также условия соприкосновения исходной инструментальной поверхности с обрабатываемой поверхностью с интерференцией и условие отсутствия пересечений. Родин П.Р. выделял прямую задачу, связанную с проектированием режущего инструмента по заданной детали и известной схеме формообразования, и обратную задачу, которая заключается в определении формы поверхности, которая может быть получена известным инструментом при заданной схеме обработки. В этой же работе были рассмотрены схемы и математические зависимости обработки винтовых поверхностей.

В дополнение работы [144] в исследовании [94] были добавлены три новых задачи формообразования:

-двустороннюю задачу, при решении которой определяются параметры исходной производящей поверхности и параметры формируемой поверхности детали;

- кинематическую задачу – заданы параметры движения;

- комбинированную задачу – могут быть известны как исходная производящая поверхность, так и параметры движения.

Автором [32] в развитие работы [94] была предложена шестая задача, заключающаяся в оптимизации тех или иных параметров.

При решении описанных выше задач формообразования общим подходом является то, что требуется определить огибающую семейства поверхностей.

Однако, недостатком решения задач формообразования методом огибающей является то, что поверхность заготовки будет состоять из огибающих семейства поверхностей и из-за наличия интерференции детали и инструмента, наличия переходных кривых будет происходить несовпадение семейства поверхностей с поверхностью реальной детали [101].

Поэтому в развитие предложенных ранее задач формообразования была предложена модель обволакивающей, устанавливающей модель реальной поверхности. [164].

Развитием теоретических положений модели обволакивающей [165] стала ее практическая реализация при компьютерном анализе работы конических и гипоидных зубчатых колес [33,34].

Получили развитие и другие методы, не использующие теорию огибающих, например, «недифференциальный» подход, изложенный в работе [45].

Недостатком решения задач с помощью модели огибающей и моделью обволакивающей является то, что данные методы не всегда подходят для обработки на станках с ЧПУ так как кинематика процесса формообразования станка во многих случаях реализуется встроенным в САМ-систему

математическим аппаратом по твердотельной геометрической модели и заранее не всегда известна.

Из-за технологической неспособности традиционных зубофрезерных станков реализовывать более трех одновременных движений формообразования сложно-профильные поверхности, изготавливаемые на таких станках заменялись более простыми, что вносило дополнительные погрешности формообразования.

Одним из первых отечественных исследователей, затронувшим вопросы точности, был Н.Г. Бруевич [19]. Он рассматривал первичные и вторичные погрешности механизмов аналитическим способом.

Шишков В.А. [166] в своих работах рассматривал погрешность как расстояние реальной производящей поверхности от теоретической.

Литвиным Ф.Л. в работе [98,99] было рассмотрено влияние первичных погрешностей и приведены аналитические зависимости по определению величины компенсирующего перемещения механизма с погрешностями.

В работе [85] были рассмотрены принципы изготовления зубчатых передач, не чувствительных к погрешностям сборки.

В работах [54,55,179] и в других работах были рассмотрены вопросы точности профилирования зубьев зубчатых колес в зависимости от различных конструктивных параметров инструмента.

На точность размеров и формы обрабатываемых сложно-профильных поверхностей значительное влияние оказывает непрерывно изменяющиеся параметры резания.

Вопросы стабилизации динамических процессов резания и их влияние на точность при формообразовании деталей были рассмотрены в большом количестве работ [39,11,65] и др.

Необходимость обработки сложно-фасонных поверхностей возникла еще в XV веке и была связана с необходимостью обработки монет, украшений и других изделий, форма которых затрудняла осуществление технологических

операций с использованием ручного труда. Именно тогда появились первые копировальные станки [60].

В работе [143] приведено следующее определение сложных пространственных поверхностей: таковой называют поверхность, в дифференциальной окрестности каждой точки которой главные кривизны от одной ее точки к другой бесконечно близкой точке изменяются либо по величине, либо по ориентации главных секущих плоскостей, либо по тому и другому одновременно.

В работе [96] указано, что к сложно-фасонным поверхностям можно отнести такие, для которых процесс формообразования сопровождается непрерывным изменением динамических и кинематических параметров резания, связанных как с геометрией и траекторией перемещения инструмента, так и с геометрией обрабатываемой поверхности.

В современных многокоординатных станках ЧПУ реализация кинематики резания возложена на электронные связи станка, вращательные и поступательные движения реализуются отдельным приводом, а траектория перемещения инструмента может быть задана нелинейно.

В работах [96], [100] приведены три основных способа создания управляющих программ – метод программирования на стойке станка с ЧПУ, метод ручного программирования в G-кодах станка и метод создания с помощью CAD/CAM систем.

Ручное программирование и программирование на стойке станка при изготовлении сложно-фасонных деталей нецелесообразно из-за высокой трудоемкости и высокой сложности расчета траектории формообразующих движений [2]. Кроме того, ввод управляющей программы на станке ведет к дополнительным простоям станка [42]. Указанные недостатки устраняет способ программирования с использованием систем автоматизированных систем подготовки управляющих программ – САМ систем.

Наибольшая эффективность использования станков с числовым управлением может быть достигнута при формообразовании сложно-

профильных поверхностей [16], которое в условиях единичного и мелкосерийного производства во многих случаях является экономически обоснованным решением [147].

Подготовка управляющей программы с использованием САМ-систем требует геометрического моделирования как заготовки, так и конечной детали [89]. Поэтому поверхностное твердотельное моделирование проектируемого изделия при формообразовании деталей на станках с ЧПУ, в большинстве случаев является центральной задачей конструкторско-технологического обеспечения [173,163,120,151,1,168].

Изменение ранее известных подходов к формообразованию поверхностей привело к возникновению нового дифференциально-геометрического метода решения задачи формообразования [143], при котором первичной является формообразуемая поверхность детали, а используемые для ее обработки методы и средства (в том числе и инструмент) как вторичные.

Одной из важнейших задач при подготовке управляющих программ на станке ЧПУ является определение движений, которое совершает инструмент и заготовка на станке в процессе механической обработки.

Используя программное обеспечение и встроенный математический аппарат САМ систем во многих случаях можно быстро и с наименьшей трудоемкостью определить траекторию движения инструмента и получить управляющую программу [174,11]. На предприятиях машиностроения, имеющих значительную долю сложно-фасонных деталей в общем объеме выпуска, более половины деталей изготавливаются на станках с числовым программным управлением [42].

При сравнении систем с ЧПУ по отношению к системам с ручным управлением ряд авторов отмечают, что основное время для станков с ЧПУ зачастую оказывается большим, чем для станков с ручным управлением [79,53].

При ручном управлении станком рабочий зачастую способен учесть влияние переменной ширины или глубины резания, затупление инструмента и др. на точность обработки, рабочий-оператор станка с ЧПУ такой возможности не имеет [40], что приводит к занижению режимов резания сложно-профильных поверхностей в управляющей программе [116,11].

Современные программные средства CAD/CAM/CAE/PDM позволяют решать как задачи создания и проектирования [191,192,193], так и задачи обеспечения точности формообразования сложно-профильных поверхностей с использованием имитационного моделирования [102,101,78,76,77,130,192], что в конечном итоге повышает эффективность технологических процессов [64].

При формообразовании сложных пространственных поверхностей более выгодно использовать инструменты с линейным контактом обрабатываемой поверхности с режущей кромкой. Однако, при механической обработке сложно-профильных поверхностей используется только точечный контакт инструмента с обрабатываемой деталью [95,96,75,39,134]. Для фрезерования таких поверхностей резанием применяют концевые фрезы. Метод обработки концевыми фрезами особенно широко применяется в авиа и ракетостроении. Лимитирующим фактором лезвийной обработки при обработке пространственно-сложных поверхностей является возможность обработки одной детали, иначе при поломке инструмента потребуются переналадка, которая может привести к снижению точности, что во многих случаях недопустимо [77].

Для создания технологии обработки сложно-фасонных поверхностей, как правило, необходимо проектирование специального инструмента или расчета траектории стандартного инструмента [95].

Для формообразования сложнопрофильных поверхностей с целью снижения трудоемкости механической обработки и снижения коэффициента использования материала находят применение новые технологии и оборудование. Например, станок DMG Mori Lasertec 65 3D [188] сочетает в

себе аддитивные технологии, основанные на получении заготовки с помощью лазерной наплавки и возможности последующего многокоординатного фрезерования (рисунок 1.2). Несомненно, что такое оборудование и технологии станут особо востребованы при снижении их стоимости для изготовления сложно-профильных поверхностей деталей.

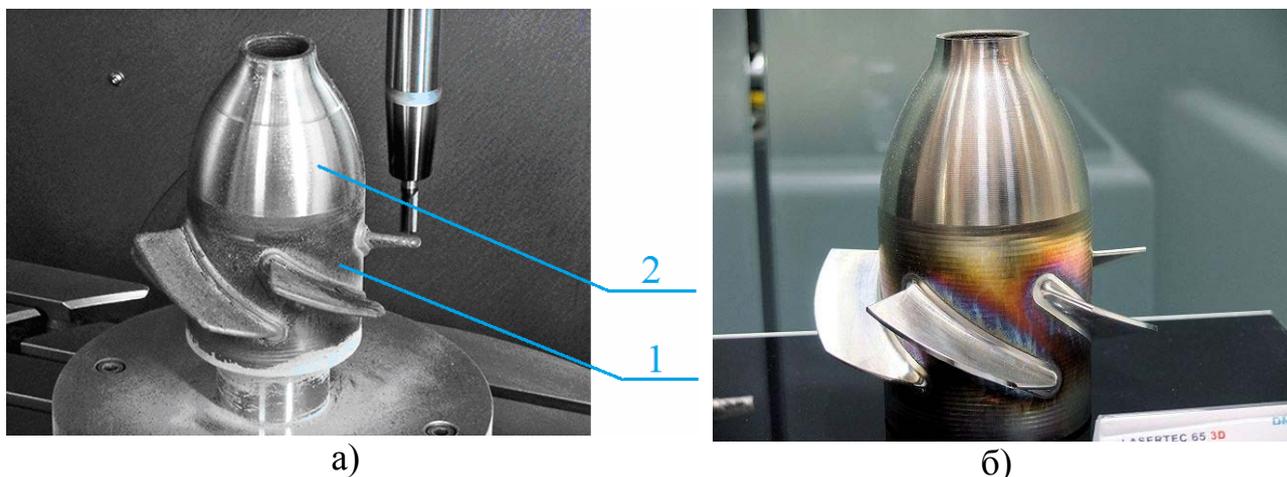


Рисунок 1.2. Деталь, полученная на одном станке комбинацией лазерной наплавки и фрезерования [188]: а) 1-наплавленная поверхность заготовки; 2-поверхность, полученная фрезерованием; б) аналогичная деталь, полученная на одном станке комбинацией лазерной сварки и фрезерования.

1.3. Особенности формообразования зубьев зубчатых колес.

Технологически все способы получения боковой поверхности зубьев колес механической обработкой традиционно сводятся к трем методам: копирования, обкатки, огибания или их сочетаниям. Основные технологические методы образования поверхности зубьев приведены на рисунке 1.3.

Эвольвентный профиль может быть получен методом копирования или методом обкатки. Метод копирования (рисунок 1.4) реализуется на специальных, универсально-фрезерных станках с делительным устройством, либо станках с ЧПУ.

При использовании метода огибания поверхность зуба зубчатого колеса формируется как огибающая последовательных положений режущих кромок инструмента при отсутствии станочного зацепления нарезаемого зубчатого колеса с воображаемым.

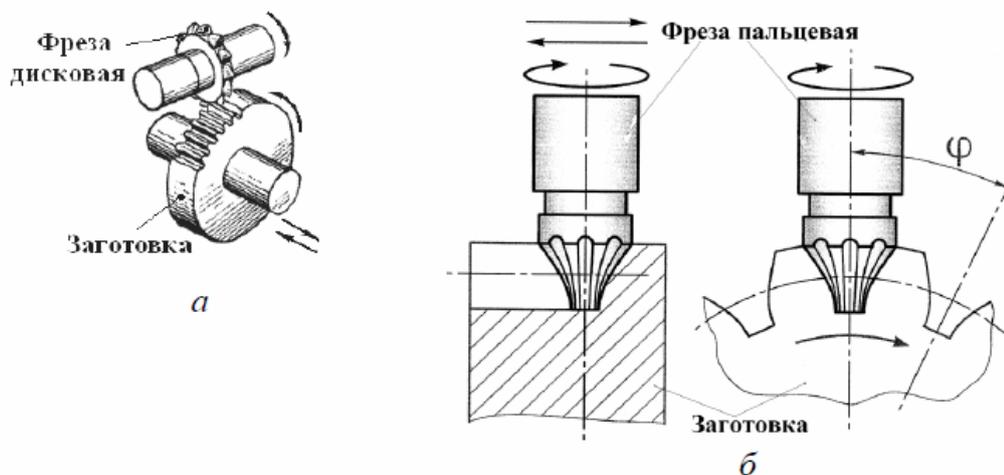


Рисунок 1.4. Нарезание зубьев зубчатых колес методом копирования
а) нарезание дисковой модульной фрезой, б) нарезание пальцевой модульной фрезой

Помимо трех перечисленных основных способа получения зубьев колес практическое применение находят способы зубофрезерования, являющиеся комбинацией методов. К таким способам можно отнести метод кругового протягивания [6]. При реализации способа протягивания зубьев каждая производящая линия инструмента снимает стружку, оставляя след режущей кромки в виде дуги окружности (метод копирования), а формообразование зуба по длине происходит за счет огибания следов режущих кромок в пространстве (метод огибания).

Для осуществления зубонарезания при достаточности формообразующих движений на классическом зубообрабатывающем оборудовании обработка во многих случаях является наиболее оптимальным и экономически обоснованным решением.

Однако развитие многокоординатных станков с ЧПУ позволило преодолеть ряд технологических ограничений, присущих классическому зубонарезанию, что способствует развитию новых способов формообразования зубьев [156].

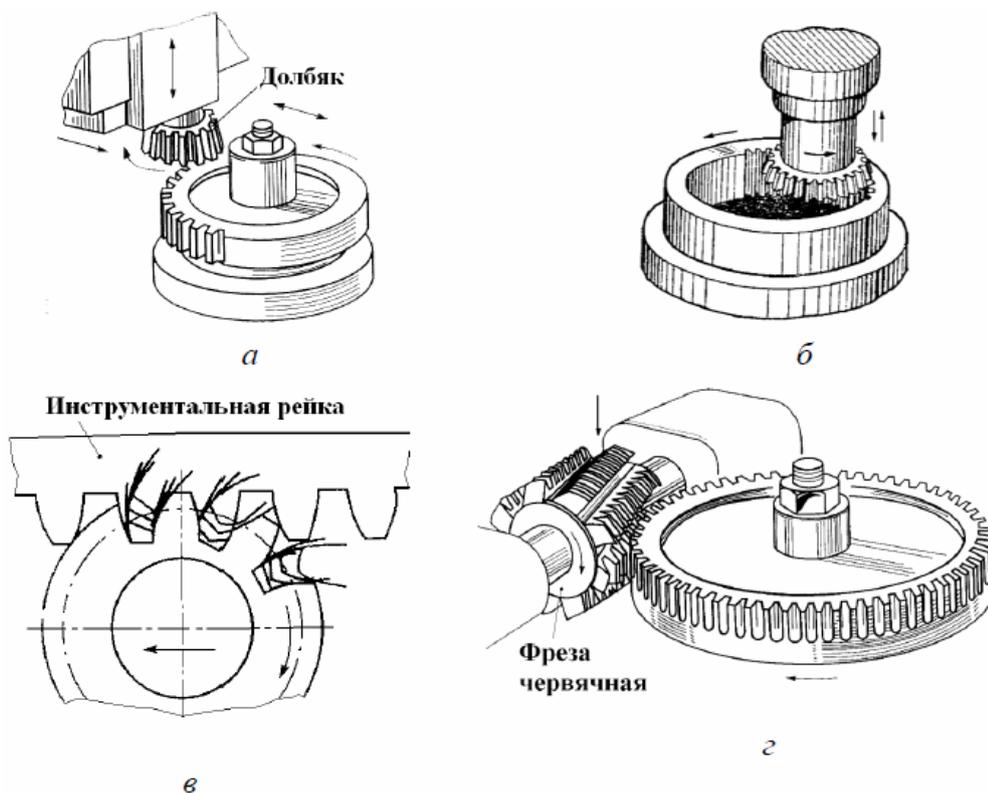


Рисунок 1.5. Нарезание зубьев зубчатых колес методом обкатки

а) долбяком с внешним расположением зубьев; б) долбяком с внутренним расположением зубьев; в) нарезание инструментальной рейкой; г) нарезание червячной фрезой

1.4. Проектирование и производство гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны.

Известно, что существующая возможность изменения межосевого угла применительно к передачам с перекрещивающимися осями значительно увеличивает многообразие таких передач. Это количество увеличивается многократно при добавлении связанных с этими типов передач, варианты профилей зубьев и методы изготовления [150]. Указанное обстоятельство

предопределило конструктивное многообразие видов передач со скрещивающимися осями.

При изготовлении на традиционных зубофрезерных станках формообразующие движения зачастую заменялись более простыми. Так, например, до сих пор в ГОСТ 16530-83 «Передачи зубчатые. Термины, определения и обозначения» к гиперболоидным передачам второго рода относят: червячную передачу, спироидную передачу, а к гиперболоидным передачам первого рода – гипоидную передачу и винтовую передачу. У всех перечисленных выше видов передач происходит замена гиперболоидной аксоидной поверхности на отличную от однополостного гиперболоида вращения начальную поверхность [25,49]. Следует отметить, что на рассматриваемую в работе зубчатую передачу отсутствует в ГОСТ’е закреплённая терминология, отсутствуют какие-либо другие ГОСТы (рисунок 1.6).

Зубчатая передача	ГОСТ 16530-83	Форма начальной поверхности	ГОСТ	
Спироидная зубчатая передача	Гиперболоидные зубчатые передачи	Коническая	22850-77	
Гипоидная зубчатая передача		Коническая	16530-83	
Винтовая зубчатая передача		Цилиндрическая	16531-83	
Червячная зубчатая передача		Отличны от конических	18498-89	
Гиперболоидная зубчатая передача с зубьями двойной кривизны		?	Однополостной гиперболоид вращения	?

Рисунок 1.6. К проблеме терминологии рассматриваемой в работе зубчатой передачи

В работе [8] приведена классификация зубчатых передач со скрещивающимися осями в зависимости от положения зоны зацепления (рисунок 1.7): гиперболоидные передачи I класса – такие передачи, у которых зона зацепления пересекается межосевой линией O_1O_2 (на рисунке - винтовая, червячная цилиндрическая, червячная глобоидная и добавленная автором передача с зубьями двойной переменной кривизны); гиперболоидные передачи II класса – зона зацепления смещена относительно O_1O_2 вдоль оси одного из звеньев (например, тороидно-дисковая передача, которая не реализуема из-за неизбежного подрезания зубьев, но теоретически возможна [8]); гиперболоидные зубчатые передачи III класса.

Под гиперболоидной зубчатой передачей с зубьями двойной переменной кривизны, автором понимается такая зубчатая передача, зубья которой образуются на заготовке вида однополостной гиперболоид вращения, при этом боковые поверхности зубьев меняют свою кривизну как по высоте, так и по длине зуба.

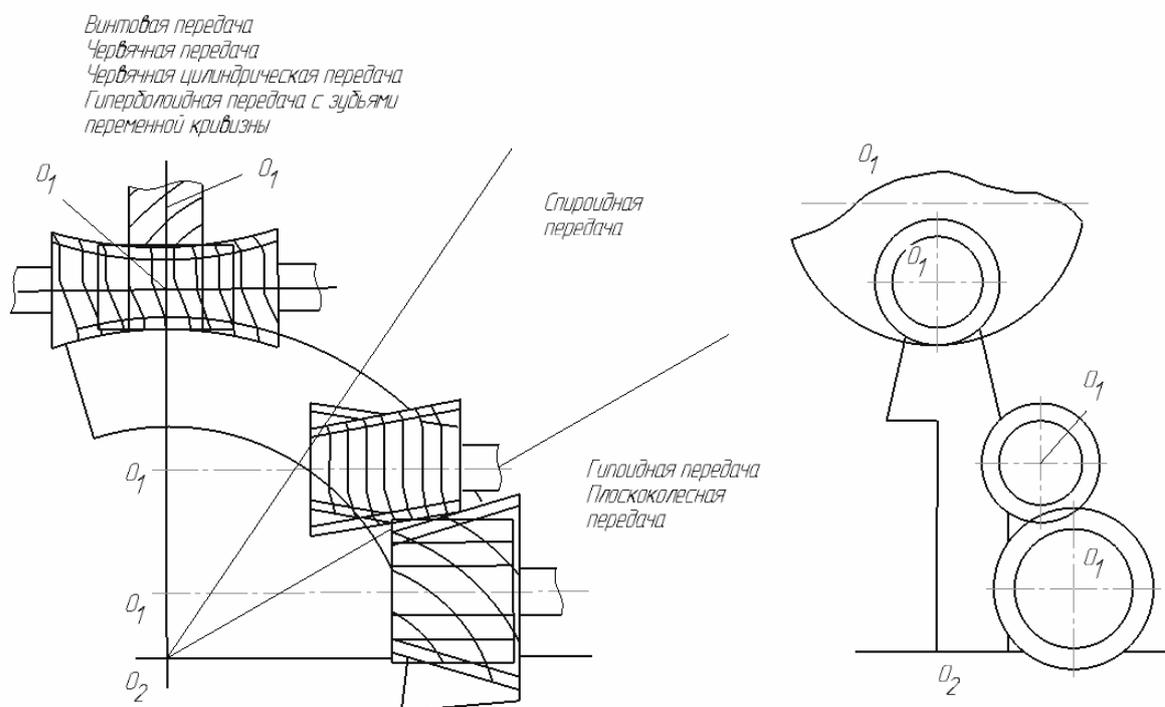


Рисунок 1.7. Расположение зоны зацепления у различных видов гиперболоидных передач [8]

Одни из первых попыток получения винтовых пространственных передач с линейным контактом относят к середине позапрошлого столетия, когда стала известна передача Оливье, а затем в 1907 г. передача Беале.

Однако, ни передача Оливье, ни передача Беале не получили широко распространения из-за недостатков, описанных в работе Мерцалова Н.И. [114].

Таблица 1.1.

Тип передачи	Предпочтительное передаточное число	Теоретический контакт зубьев	Значение коэффициента перекрытия	Чувствительность к ошибкам	Нагрузочная способность	Прирабатываемость	Сталь по стали
Винтовая [8]	1-3	Точечный	1,5-2,0	низкая	низкая	высокая	+
Червячная цилиндрическая [8]	20-60	Линейный	1,5-2,5	низкая	средняя	высокая	-
Червячная глобоидная [8]	30-60	Линейный	4-5	высокая	высокая	низкая	-
Спиroidная [8]	20-60	Линейный	5-6	низкая	низкая	высокая	+
Гипоидная [8]	3-10	Точечный	3-5	высокая	высокая	низкая	+
Плоско-колесная [8]	3-6	Точечный	1,5-2	средняя	низкая	высокая	+
Гиперболоидная [123]	1-10	Линейный	6-7	н.д.*	высокая	н.д.*	+

*- нет данных

Общеизвестно, что каждая передача имеет свою область применения. В работе [8] произведено сравнение передач с перекрещивающимися осями, которое было дополнено автором работы (таблица 1.1).

Теория пространственного станочного зацепления рассматривалась различными учеными.

Так в работе [51] рассматривается теория незвольвентных зубчатых передач, нарезанных режущим инструментом при условии, что ось инструмента и ось нарезаемого колеса устанавливаются произвольным образом друг относительно друга.

Теория пространственных зубчатых передач применительно к гиперболоидным передачам с зубьями двойной кривизны была рассмотрена в работах авторов [109,110].

В работах [109,110] был разработан метод синтеза гиперболоидной передачи с зубьями двойной кривизны, рассмотрены вопросы характера контакта и относительного скольжения зубьев, дана сравнительная характеристика нагрузочной способности по сравнению с винтовой цилиндрической передачей (Таблица 1.2).

Таблица 1.2.

Сравнение зубчатых колес из материала 40Х, $a_w = 50,91$ мм (межосевое расстояние), $m_n = 3$ мм (нормальный модуль), $z = 12$ (число зубьев), $\alpha_n = 20^\circ$ (нормальный угол зацепления), $\beta_w = 45^\circ$ (угол наклона винтовой линии), $b = 40$ мм (ширина зубчатого венца), $r_2 = 25,45$ мм (радиус делительной окружности)	Передачи со скрещивающимися осями валов	
	Винтовая цилиндрическая	Гиперболоидная зубчатая передача с зубьями двойной кривизны
Максимальный К.П.Д.	82%	98%
Коэффициент перекрытия	2,003	6,6
Вид контакта	точечный	линейный
Толщина масляной пленки	$3,94 \cdot 10^{-6}$ м	$8,5 \cdot 10^{-6}$ м

В работах [109,110] был разработан метод синтеза гиперболоидной передачи с зубьями двойной кривизны, рассмотрены вопросы характера контакта и относительного скольжения зубьев.

Однако, вопросы изготовления в данной работе были сведены лишь в некоторые указания и фактически в вышеуказанных работах не были рассмотрены.

Задача изготовления гиперболоидной зубчатой передачи двойной кривизны является сложной задачей. Так, в работе [41] был сделан вывод о том, что вряд ли можно изготовить колесо на гиперболоидной заготовке из-за непреодолимых технологических трудностей.

Сложность изготовления зубьев гиперболоидных передач двойной кривизны объясняется тем, что помимо переменной по ширине колеса гиперболоидной поверхности, впадина и толщина зуба должна быть переменными [25]. Кроме того, изменяется и угол наклона зуба по его длине, его геометрическое расположение по высоте.

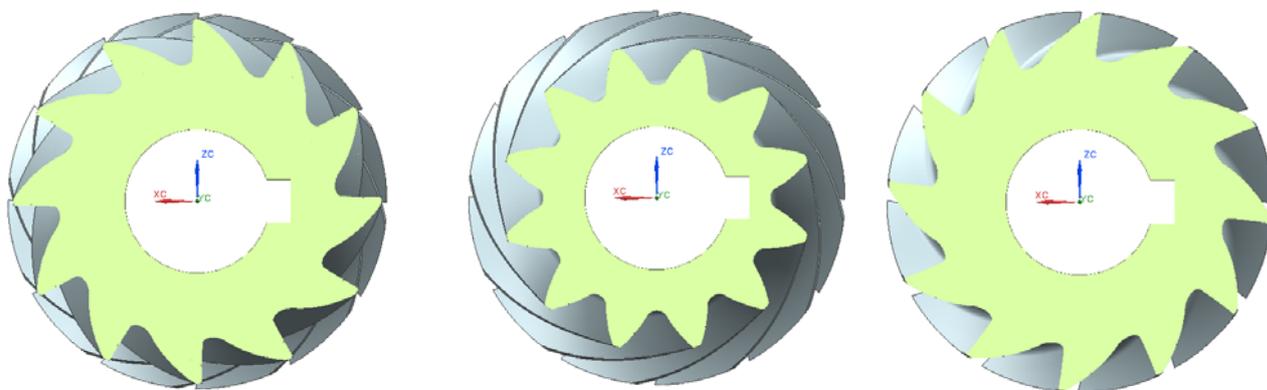


Рисунок 1.9. Сечения z одного зуба зубчатого колеса (ось z направлена в направлении взгляда)

А) $z=-13\text{мм}$

$z=0$

$z=13\text{мм}$

Переменная кривизна боковой поверхности зуба (рисунок 1.9) создает технологические трудности для использования метода обкатки для нарезания зубьев таких колес.

Из-за невозможности реализовать нарезание зубчатых колес данного типа исследователями разрабатывались различные схемы формообразования и приспособления для формообразования таких зубьев (рисунок 1.10).

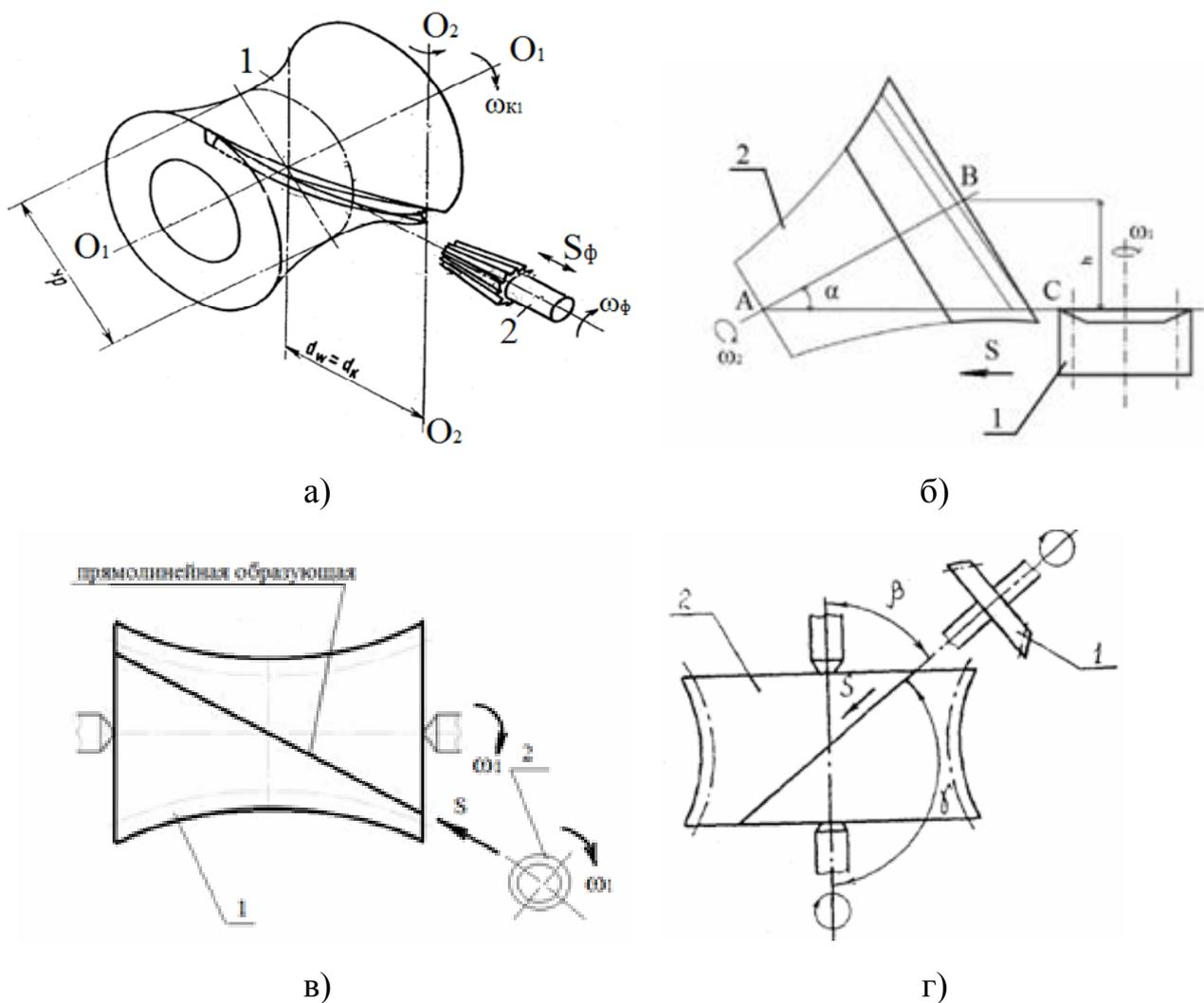


Рисунок 1.10 Схемы формообразования гиперboloидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны:

- а) схема формообразования, рассмотренный в работах [110,122,123]; б) схема формообразования, рассмотренная в работе [82]; схема формообразования, рассмотренная в работе [28]; схема формообразования, рассмотренная в работе [25]

Недостатками конструкций разработанных приспособлений и схем формообразования являются трудности их реализации, снижение точности формообразования зубьев, изготовленных такими способами из-за удлинения кинематических цепей станков. Кроме того, впадина и толщина зуба у колеса

на основе точного гиперboloида должны быть переменными из-за увеличения диаметра заготовки от горла гиперboloида до его торцов [25]. Постоянная толщина зуба и впадина приведут к интерференции зубьев и к неработоспособности зубчатых колес, изготовленных данными приспособлениями.

В настоящее время, многие авторы, исследующие возможность формообразования зубьев зубчатых колес на заготовках вида однополостной гиперboloид вращения, идут по пути получения САD модели боковой поверхности зуба гиперboloидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны и уже через твердотельную модель решить непреодолимые ранее трудности изготовления гиперboloидных зубчатых колес. В направлении получения твердотельной геометрической модели зубчатого колеса, образуемого на основе однополостного гиперboloида, существует достаточно большое количество работ [27,28,29,30,31,36,37,38,130,131,133,134,193].

Общим недостатком работ [27,28,29,30,31,36,37,38,193] является отсутствие математических зависимостей, опирающихся на теорию формообразования, а также методик геометрического моделирования гиперboloидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны без которых твердотельное геометрическое моделирование таких зубчатых колес невозможно. Кроме того, корректная геометрическая модель таких зубчатых колес в вышеперечисленных работах так и не получена.

Существующая методика определения положения производящих линий по длине зуба, представленная в работе [123], трудоемка и сложна, поэтому автору для того, чтобы не увеличивать порядок уравнений, пришлось использовать метод подбора для расчета координат производящих линий. Все вышеперечисленное применительно к методике расчета производящих линий значительно увеличивает вероятность ошибки при расчете производящих линий боковой поверхности зуба гиперboloидного зубчатого колеса.

В работе [28] (рисунок 1.10, в) предлагается вести обработку нарезания зубьев на заготовке вида однополостной гиперboloид вращения на 4-х

координатном станке ЧПУ концевой фрезой. Недостатком работы является отсутствие математических зависимостей кинематики многокоординатной обработки, что делает невозможным соблюдение «третьего условия формообразования», указанного в работе [143], согласно которому поверхность может быть правильно образована только при отсутствии интерференции получаемой поверхности и инструмента в окрестности каждой точки касания.

В работе [26], по заверениям автора, изготовлены зубчатые колеса на гиперболоидной заготовке. Однако, элементарный визуальный анализ изготовленных зубчатых колес показывает, что зубчатые колеса формообразованы только на окологорловой части однополостного гиперболоида. Известно, что аппроксимацией окологорловой части однополостного гиперболоида вращения цилиндром получают винтовые зубчатые колеса с точечным характером контакта. Кроме того, нарезанные зубчатые колеса с углом наклона зубьев $\beta_1=45^0$ нарезались вдоль прямолинейной образующей. Аналогично работе [26] в работах [80,145,82,28,25] предлагается при формообразовании зубьев подачу инструмента осуществлять вдоль прямолинейной образующей. Однако, формообразование гиперболоидных колес необходимо осуществлять [123] в условиях изменения межосевого расстояния (из-за разного диаметра горлового и торцевого сечений гиперболоида) и дополнительного вращения заготовки или инструмента (помимо вращения вокруг своей оси). Однако указанных формообразующих движений способы не содержат, что делает невозможным изготовление такими способами гиперболоидных зубчатых колес.

Анализ литературных источников показывает, что в настоящее время задача нарезания зубьев на заготовках вида однополостной гиперболоид так и не решена [81,82,31]. Из-за непреодолимых трудностей изготовления такие передачи не изготавливаются в промышленности.

Переменная кривизна зубьев и ширина впадины зуба по его длине у зубчатых колес, нарезаемых на заготовках вида однополостной гиперboloид вращения не позволяет использовать производительные методы обкатки, а также другие методы, используемые для нарезания косозубых колес [176,177,189] для формообразования таких зубьев.

1.5. Применимость методов финишной обработки для формообразования зубьев на однополостном гиперboloиде вращения.

К качеству обработки боковых поверхностей зубьев предъявляют высокие требования, которые труднодостижимы на зуборезных операциях, поэтому технологический процесс обработки зубчатых колес включает зубоотделочные операции [103].

В качестве отделочной обработки зубьев обычно используют шевингование, хонингование и другие виды окончательной механической и физико-технической обработки [83] (рисунок 1.11).

Известно, что при обработке сложно-профильных поверхностей деталей используют два вида механической обработки: со свободной кинематической связью «деталь-инструмент» и с заданной кинематической связью «деталь-инструмент» [169,170,171]. Формообразование с заданной кинематической связью системы «инструмент-деталь» позволяет автоматически получать необходимую точность размеров и геометрической формы. Так называемая обработка со свободной кинематической связью «инструмент-деталь» – необходимую шероховатость и физико-механические показатели поверхностного слоя.



Рисунок 1.11. Методы финишной обработки зубьев зубчатых колес

Размерная обработка лезвийным инструментом осуществляется червячными фрезами, долбяками, зуборезными гребенками, шеверами и обкаточными резцами с точностью до 6 степени и шероховатостью до $R_a=0,63$ мкм. [13]. Из-за переменного окружного модуля и шага зубьев и их формы перечисленные способы не подходят для гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны, рассматриваемых в работе.

Шевингование позволяет снизить погрешность профиля, направление шага и биение венца и уменьшить шероховатость поверхности до $R_a=0,32$ мкм [83]. Зубошевингование является одним из самых производительных и экономических выгодных методов финишной обработки. К недостаткам метода следует отнести невозможность обработки закаленных зубчатых колес [73], а также технологические сложности изготовления такого инструмента.

Развитием метода шевингования является разработанный в ТулГУ метод шевингования-прикатывания [105,106], основанный на уменьшении погрешностей заготовки и снижения шероховатости внеполюсным зацеплением инструмента и обрабатываемого колеса за счет снятия припуска

частично резанием, а частично выглаживанием за счет профильного проскальзывания.

Находит применение доводка цилиндрических зубчатых колес посредством обкатывания специальным инструментом-«шарошкой» [20,21]. Инструмент представляет собой шестерню, геометрия которого разработана таким образом, что при вращении обрабатываемого колеса с инструментом происходит неполное зацепление с проскальзыванием контактирующих точек поверхности. Микрорезание осуществляется за счет совокупности кратеров режущих кромок инструмента, полученных электроэрозионной обработкой.

Шлифование относят к методам чистовой обработки зубьев абразивным инструментом. Процесс обработки осуществляют методом копирования или обкатки различными шлифовальными кругами. Почти все способы шлифования зубьев из-за переменности окружного модуля, шага и формы зубьев гиперболических зубчатых колес с зубьями двойной кривизны не подходят для чистовой обработки таких зубьев. Исключение составляет способ строчечного шлифования [169], который может быть реализован для гиперболических зубчатых колес с зубьями двойной кривизны на многокоординатных шлифовальных станках или многокоординатных фрезерно-шлифовальных обрабатывающих центрах.

Широкое использование для обработки зубьев находит зубохонингование, которое не шаржирует рабочую поверхность как притирка и обеспечивает значительный съем материала по сравнению с методами обкатки, полирования и суперфиниша и может быть даже более производительным, чем шлифование [149]. Для гипоидной зубчатой и конических передач метод реализуется на станках, имеющих угловую компоновку [72]. В качестве инструмента используют специально рассчитанное металлическое колесо с нанесенным слоем кубического нитрида бора [72]. Метод повышает долговечность зубчатых колес в 2-3 раза [154].

Недостаток метода – использование сложного, дорогостоящего и не универсального режущего инструмента [72].

Притирку зубьев применяют для уменьшения параметра шероховатости поверхностей зубьев и незначительного исправления формы и расположения пятна контакта с целью получения плавной и бесшумной передачи. Притирку довольно часто применяют для конических и гипоидных зубчатых колес. Недостатком является необходимость подбора пары перед притиркой и сборкой, ограниченность исправляющего эффекта [87,70].

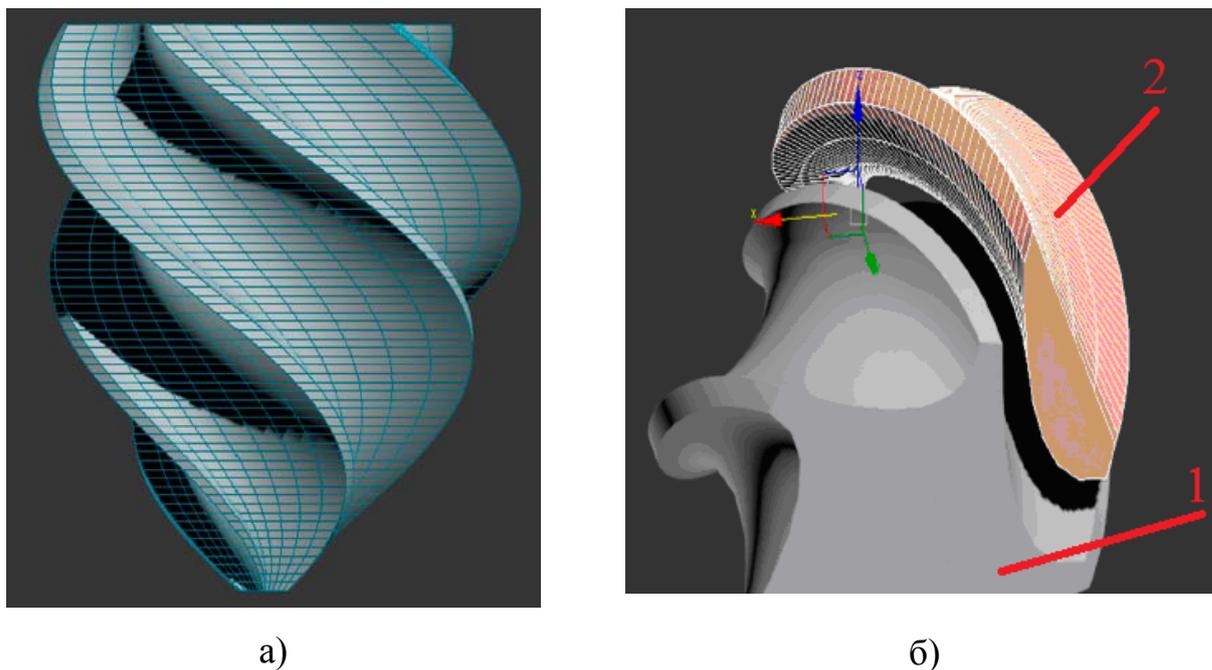


Рисунок 1.12: а) внешний вид модели фасонного электрод инструмента; б) построение электрод инструмента средствами САПР путем обратного копирования профиля детали и корректировки его на величину межэлектродного зазора

Зубохонингование и притирка малопроизводительны и обладают низким исправляющим эффектом, а зубошлифование является очень дорогой операцией. Высокий исправляющий эффект может быть достигнут финишной электрохимической обработкой [104]. Различают электро-химическую обработку методом обката и копирования [154]. В работе [91] предложено электрод-инструмент для обработки сложно-профильных поверхностей может быть получен выращиванием на 3D принтере по CAD-модели из металла или

пластика с нанесением на основание 1 токопроводящего материала 2 (рисунок 1.12) [91].

Электрохимическим полированием повышают чистоту шлифованных поверхностей зубчатых колес приблизительно на 1 класс [154].

Существует большое количество комбинированных методов финишной обработки: электрохимическое хонингование, алмазное электроэрозионно-химическое хонингование, электрохимическая обработка с наложением ультразвуковых колебаний, анодно-механическая обработка зубчатых колес и другие. Комбинированные способы финишной обработки являются более эффективными, так как могут сочетать преимущества нескольких видов обработки [13].

Для безразмерной финишной обработки труднодоступных поверхностей сложнопрофильных деталей используют различные методы. Так, финишную обработку сложнопрофильных деталей авиастроения осуществляют эластичными шлифовальными лентами на многокоординатных ленточно-шлифовальных станках [9].

Для обработки деталей сложной формы в виде профильных штампов, форм для литья под давлением, сверл и другого многолезвийного инструмента используют абразивную обработку свободными абразивами. Существует достаточно большое количество методов обработки свободными абразивами, классификация которых по данным работы [141] приведена на рисунке 1.13.

Обработка направленным потоком частиц [141] заключается в воздействии струей рабочей среды на обрабатываемое изделие. При обработке со скольжением частицы прижимаются под действием центробежных или магнитных сил.

Шпиндельная обработка в среде свободного абразива рассмотрена в работе [35]. При обработке данным методом деталь закрепляется в шпиндель и помещается в рабочую среду абразива, в которой происходит обработка.

Обработка сложнопрофильных зубчатых колес эластичными полимерабразивными волокнами рассмотрена в работе [142].

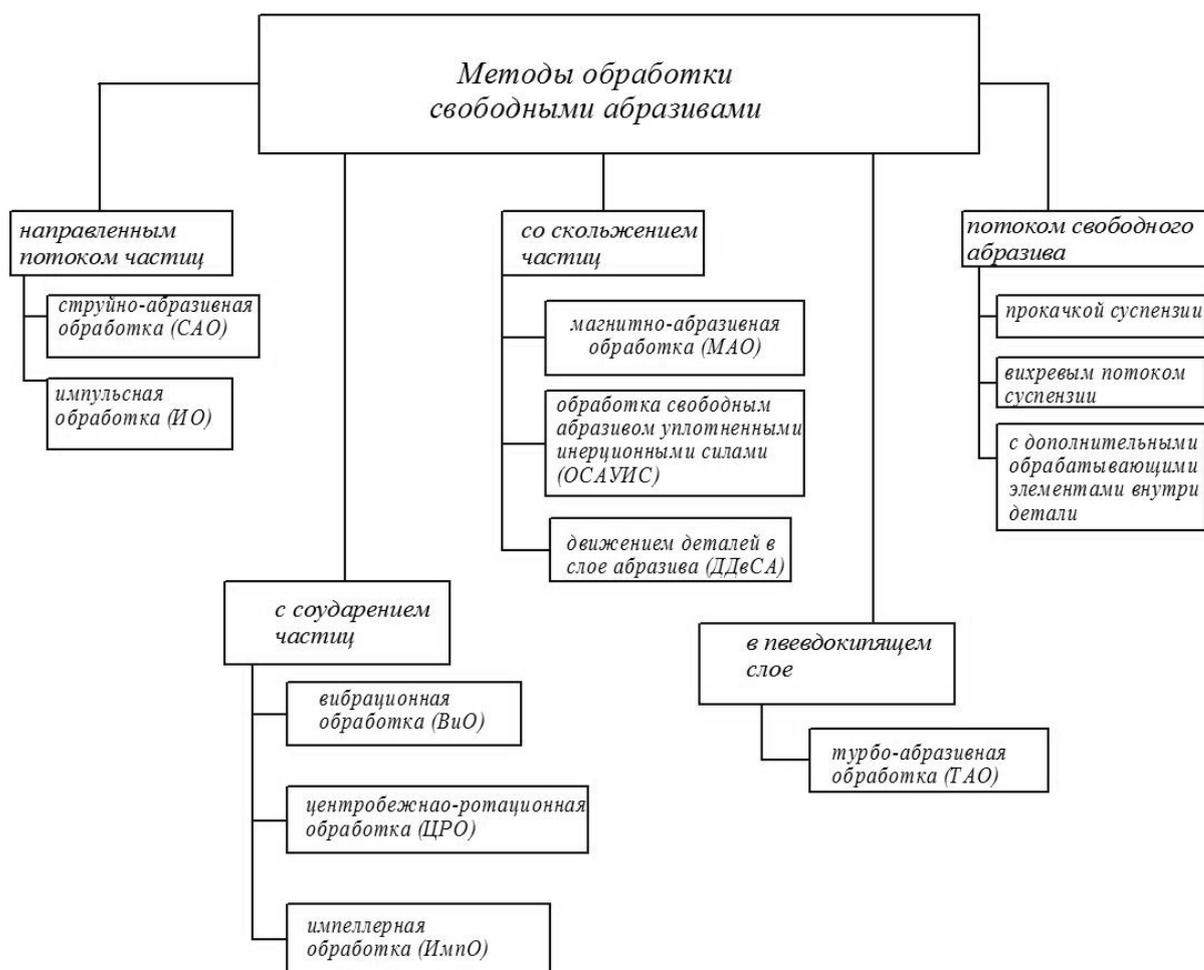


Рисунок 1.13. Классификация методов обработки свободными абразивами [141]

Автоматизация обработки сложнопрофильных поверхностей может быть достигнута за счет использования промышленных роботов, обеспечивающих ориентацию полимерабразивного эластичного инструмента относительно обрабатываемой детали [162].

В работе [136] приведены сведения о большой группе эластичных шлифовальных кругов с упругим основанием в виде монолитной резины разной твердости, полиуретана, поролона, надуваемого полого валика, на основе нетканых материалов, из каркаса на основе витой металлической проволоки и другие.

В работе [5] и достаточно большом количестве аналогичных работ предложен эластичный инструмент-иглошевер, собранный из элементарных

зубчатых дисков, жестко соединенных с друг другом, на одном из торцов которого закреплен проволочный ворс в виде большого числа проволочек, расположенных перпендикулярно на боковых сторонах инструмента.

Таким образом, существует достаточно большое количество разнообразных эластичных абразивных инструментов. Достоинством таких инструментов являются более широкие возможности варьирования параметров механической обработки, а также то, что их рабочая поверхность способна принимать форму обрабатываемой поверхности и осуществлять обработку сложно-профильных поверхностей.

Таким образом, по результатам обзора литературных источников наиболее подходящим для финишной обработки рассматриваемых в работе зубчатых колес, по мнению автора, является метод электрохимической обработки. При этом фасонный электрод-инструмент может быть получен по твердотельной модели с использованием аддитивных технологий. Вместе с тем, следует отметить, что могут быть использованы и другие способы финишной обработки зубьев.

Выводы по главе.

Анализ литературных источников показал, что проблема изготовления зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны до настоящего времени не решена.

Многие исследователи пытались решить проблему изготовления гиперболоидных колес с использованием различных технологических методов и инструментального обеспечения. Предпринималась попытка практической реализации изготовления гиперболоидных колес методом обкатки, однако, осуществить ее не удалось из-за большой вибрации технологической системы. Кроме того, существующими инструментами реализовать как метод копирования, так и метод обкатки для окончательного формообразования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны не удастся из-за

переменной величины шага и модуля зубьев. Для изготовления гиперболоидных зубчатых колес методом копирования предлагалось использовать специальные приспособления, создававшие дополнительные погрешности при формообразовании.

Из-за различных технологических сложностей предлагаемые способы и методы формообразования зубчатых колес на заготовке вида «однополостной гиперболоид вращения» не нашли широкого практического применения.

Для использования метода обкатки в ряде работ предполагалось использовать гиперболоидный инструмент 3-го рода (по классификации П.Р. Родина), однако сложности изготовления такого инструмента аналогичны тем, что имеются при изготовлении гиперболоидного зубчатого колеса, которые по настоящее время не устранены.

Таким образом, **целью** диссертационной работы является осуществление практического формообразования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны на многокоординатных станках с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель формообразования зубьев на станке с ЧПУ с управлением ориентацией траектории фрезы и получение управляющей программы для изготовления гиперболоидного зубчатого колеса на пятикоординатном станке с ЧПУ.
2. Получить математическую зависимость для определения пространственного положения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны.
3. Получить геометрическую модель гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны.
4. Разработать способ предварительного формообразования зубьев гиперболоидной передачи модульными дисковыми и пальцевыми фрезами.

5. Разработать инструмент для профильной модификации зубьев зубчатых колес.
6. Получить математические зависимости для образующих линий зубьев дугами окружности и эллипса.

ГЛАВА 2.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ЛИНИИ И ОБРАЗУЮЩИХ ЛИНИЙ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ.

Образующая линия при движении вдоль направляющей линии зуба формирует боковую поверхность зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны. Взаимное расположение участков образующей линии при формообразовании боковой поверхности колеса можно исследовать графическими методами, в том числе в специализированных программных пакетах по расположению линий пересечения образующей линии с различными плоскостями: перпендикулярными к оси вращения одного из колёс, перпендикулярными к одной из координатных осей и т.д.

Аналитический вывод зависимостей для расчета образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба выполним для частного случая формообразования боковых поверхностей гиперболоидного зубчатого колеса. Расчет произведем для зубчатого колеса, имеющего единичное передаточное отношение при угле скрещивания осей 90° (рисунок 2.1). Получение математических зависимостей для расчета координат точек образующей линии сопряженных производящих поверхностей выполним в параметрическом виде, учитывая, что в качестве образующей линии выбран отрезок прямой.

Геометрическое формообразование зубчатых колес сопряженного зацепления выполним, используя известные по работам Литвина Ф.Л. [98] подходы для пространственного преобразования образующей линии.

2.1. Определение координат точек образующей линии при формообразовании боковой поверхности зубьев.

Так как делительные гиперболоиды являются телами вращения, расчет образующей линии выполним для пространственной трансляции образующей линии относительно гиперболоидов, участвующих в передаче. Исследование движения точки образующей линии при формообразовании боковой поверхности позволит получить направляющую линию зуба. Для каждого гиперболоида сопряженные поверхности рассчитываем отдельно. Расчет произведем только для колеса 1, для колеса 2 выкладки будут идентичными. С гиперболоидами свяжем неподвижные системы координат $O_1x_1y_1z_1$, $O_2x_2y_2z_2$ (рисунок 2.1). Гиперболоиды представляют собой поверхности вращения гипербол, уравнения которых в параметрическом виде имеют вид:

$$x_i = a \cdot ch(t) \quad (2.1)$$

$$y_i = b \cdot sh(t), \quad (2.2)$$

где a – действительная; b – мнимая полуоси гиперболы; I – номер гиперболоида и соответствующей системы координат, $sh(t)$ и $ch(t)$ – гиперболический синус и косинус соответственно [12].

Гиперболоид 1 представляет собой делительный гиперболоид обрабатываемого зубчатого колеса. Гиперболоид 2 воспроизводит движение зубчатого колеса, работающего в паре с колесом 1. С колесом 1 связана образующая линия, формирующая профиль боковой поверхности зуба на гиперболоиде 1.

Рассмотрим движение образующей линии в системе координат $O_2x_2y_2z_2$ (рисунок 2.2). Так как образующая линия является отрезком прямой, достаточно рассмотреть движение двух ее точек: M_1 и M_2 . За точки M_1 и M_2 принимаем крайние точки образующей линии. Исследовав движение крайних точек образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба, сможем определить направляющую линию зуба.

При передаче вращения зубчатых колес между скрещивающимися осями относительное движение звеньев, как известно из теоретической механики, является винтовым. Скорость относительного движения, представленного как винтовое движение, равна сумме скоростей вращательного движения вокруг винтовой оси и поступательного движения вдоль этой же оси. Каждая из точек, принадлежащих образующей линии, участвует в двух движениях – вращении вокруг оси y_2 с постоянной угловой скоростью ω_2 (переносное движение), и движении по гиперболе вдоль y_2 с постоянной проекцией скорости на ось y_2 (относительное движение).

Начальные положения точек M_1 и M_2 задаются в сечении, нормальном к направлению боковой поверхности зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр.

Крайние точки образующей линии M_1 и M_2 соответственно соотносятся с участками гиперboloида (нижней части, ножки) зуба колеса 1 - точка M_1 , и области вершины зуба колеса 1 – точка M_2 . Каждая из точек движется в относительном движении в системе координат $x_2O_2z_2$ по своей гиперболе, ограничимся рассмотрением точки M_1 .

$$x''_{M_1} = a_{M_1} \cdot ch(t) \quad (2.3)$$

$$y''_{M_1} = b_{M_1} \cdot sh(t), \quad (2.4)$$

где a_{M_1} – действительная и b_{M_1} – мнимая полуоси гиперболы, проходящей через точку M_1 .

Для правильного зацепления зубьев необходимым условием будет постоянство окружной скорости и постоянство движения точки относительно оси y_2 .

Поэтому получим следующую зависимость:

$$d(y_{M_1})/dt = d(b_{M_1} \cdot sh(t))/dt = const \quad (2.5)$$

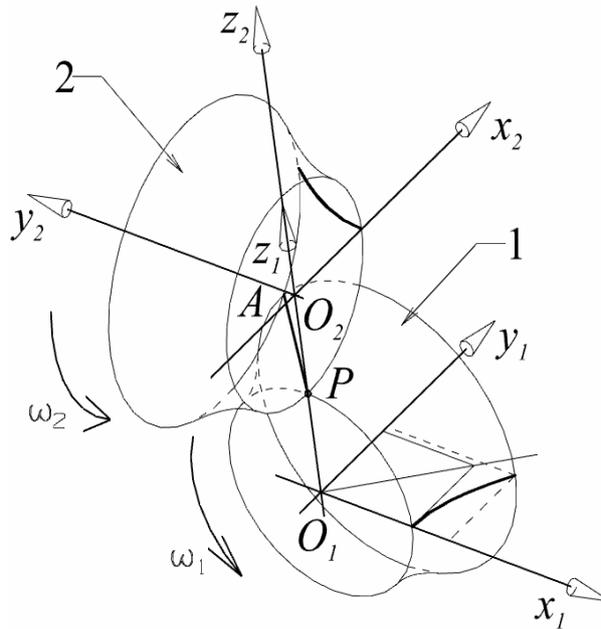


Рисунок 2.1 Делительные гиперboloиды передачи,

1- делительный гиперboloид обрабатываемого зубчатого колеса,

2- делительный гиперboloид, с которым связана образующая линия,

ω_1, ω_2 – направление вращения делительных гиперboloидов в процессе формообразования поверхности зуба.

В переносном движении точка вращается вместе с гиперboloидом, связанным с образующей линией. Угловое положение образующей линии относительно оси x_2 , в плоскости, параллельной плоскости $x_2O_2z_2$, определяется уравнением:

$$\varphi_{M_1} = \varphi_{M_{1_0}} + \omega_2 t, \quad (2.6)$$

где $\varphi_{M_{1_0}}$ - начальное угловое положение точки M_1 .

Отсюда, для того чтобы рассчитать координаты точки M_1 , совершающей сложное движение, т.е. задать в зависимости ее координаты в параметрическом виде в системе координат, связанной с образующей линией, получаем следующие зависимости, представленные матрицей:

$$\begin{pmatrix} x_2(t) \\ y_2(t) \\ z_2(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{M1}ch(t)\cos(\varphi_{M0} + \omega t) \\ h_2b_{M1}sh(t) \\ a_{M1}ch(t)\sin(\varphi_{M0} + \omega t) \\ t \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

где h_2 – коэффициент шага винтовой линии, рассчитываемый по формуле [24]:

$$h = \frac{u^*}{\omega_i} \quad (2.8)$$

где ω_i – угловая скорость винтового движения,

u^* – поступательная скорость винтового движения.

При передаточном отношении $u=1$ и угле скрещивания осей $\Sigma=90^0$, коэффициент шага винтовой линии $h=1$.

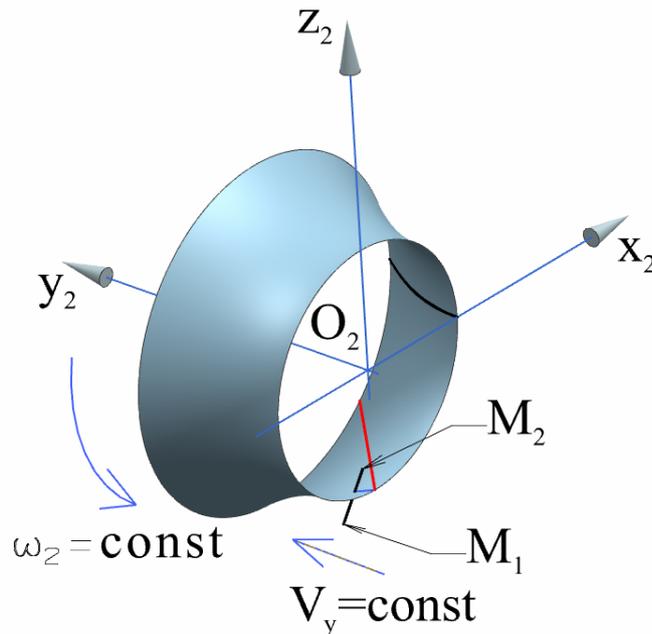


Рисунок 2.2. Схема к расчету движения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба,

M_1 -точка образующей линии, формирующая ножку зуба

M_2 -точка образующей линии, формирующая головку зуба

V_y – скорость перемещения точек M_1 и M_2 образующей линии вдоль оси

y_2

При изменении параметра t матрица (2.7) позволяет вычислить координаты точки M_1 в системе координат $O_2x_2y_2z_2$, для этого были заданы

начальное положение точки M_1 и диапазоном изменения t , а также шагом, с которым можно осуществлять расчет, обеспечивая необходимую точность.

Чтобы получить координаты образующей линии, участвующей в формообразовании боковой поверхности обрабатываемого колеса 1 (рисунок 2.1), принимаем во внимание, что образующая линия, связанная с колесом 2, вращается относительно колеса 1 с постоянной угловой скоростью ω_1 . Точки направляющей линии, образуемой на поверхности зуба обрабатываемого колеса движением точки M_1 образующей линии при изменении параметра t , будут иметь координаты, подсчитанные по зависимостям перехода от системы координат $O_2x_2y_2z_2$ к системе координат $O_1x_1y_1z_1$. Координаты точки M_1 при переходе от системы координат $O_2x_2y_2z_2$ к системе координат $O_1x_1y_1z_1$ для рассматриваемого случая (рисунок 2.2) будут определяться из следующих соотношений:

$$x_1(t) = O_1O_2 \sin(\omega t) - y_2 \cos(\omega t) + z_2 \sin(\omega t), \quad (2.9)$$

$$y_1(t) = x_2(t) = a_{M_1} \operatorname{ch}(t) \cos(\varphi_{M_0} + \omega t),$$

$$z_1(t) = O_1O_2 \cos(\omega t) + y_2 \sin(\omega t) + z_2 \cos(\omega t),$$

где O_1O_2 (рисунок 2.1) – отрезок прямой, соединяющий центры гиперboloидов – их межосевое расстояние,

x_2, y_2, z_2 – координаты точки M_1 в системе координат $O_2x_2y_2z_2$ рассчитываются по зависимости (2.7).

Соотношения применимы для компоновки, представленной на рисунке 2.1 – передаточного отношения, равного единице и угла перекрещивания осей 90 градусов. Координаты точек направляющей линии, образованной движением точки M_1 образующей линии, при формообразовании боковой поверхности зуба будут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ z_1(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} O_1O_2 \sin(\omega t) - y_2 \cos(\omega t) + z_2 \sin(\omega t) \\ x_2 \\ O_1O_2 \cos(\omega t) + y_2 \sin(\omega t) + z_2 \cos(\omega t) \\ t \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Для расчета, как соотносятся угловая скорость вращения зубчатого колеса и скорость поступательного движения проекции скорости точки M_1 образующей линии на ось вращения колеса 2 (рисунок 2.1), рассмотрим рисунок 2.3, а.

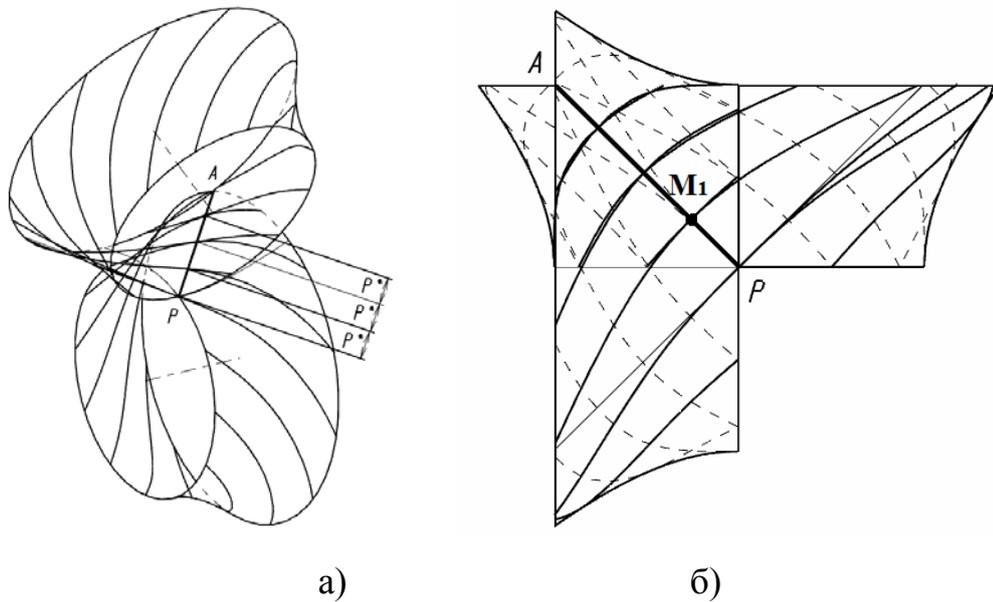


Рисунок 2.3. К расчету винтовых линий, вдоль которых формируется зуб
 а) постоянство шага винтовой линии P^* ; б) Совпадение направлений нормалей винтовых линий контактирующих зубьев на делительном гиперboloиде и сонаправленность нормалей линии контакта гиперboloидов.

Зубчатое колесо имеет заданное число зубьев Z . При повороте на угол $360^\circ/Z$, проекция точки M_1 на линию PA должна сместиться на величину шага P^* . Из теории зацепления передач с перекрещивающимися осями шаг P^* должен оставаться постоянным [41], несмотря на то, что диаметр увеличивается по закону гиперболы, соответственно меняется окружной модуль при постоянном числе зубьев, что и учтено в соотношении (2.7). Аналогичным образом рассчитывается траектория движения точки M_2 образующей линии M_1M_2 , для моделирования боковой поверхности колеса 1. Затем, используя тот же подход, рассчитывается сопряженная поверхность для колеса 2, при этом колесо 2 считается неподвижным и обкатываем вокруг него производящее колесо 1.

Для передаточного отношения равного единице и угла скрещивания осей зубчатых колес 90 градусов получим уравнение:

$$\begin{pmatrix} x_1(t) \\ y_1(t) \\ z_1(t) \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} O_1 O_2 \sin(\omega t) - y_2 \cos(\omega t) + z_2 \sin(\omega t) \\ x_2 \\ O_1 O_2 \cos(\omega t) + y_2 \sin(\omega t) + z_2 \cos(\omega t) \\ t \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

Для случаев зубчатого зацепления с передаточным отношением, отличным от 1 и угле скрещивания осей отличным от 90^0 , расчет положения образующей линии при формообразовании боковой поверхности зуба может быть произведен с учетом зависимостей [112].

Расчет направляющей линии был реализован в среде MATLAB.

2.2. Определение координат образующих линий при профильной модификации зубьев.

Профиль зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны может быть образован не только прямыми линиями, но и кривыми: эвольвентами, дугами окружностей и эллипсов.

В ряде случаев, зубчатые колеса с профильной модификацией кривыми второго порядка в сравнении с зубчатыми колесами, профильная модификация которых осуществлена эвольвентой при проведении испытаний, показывают более высокие эксплуатационные характеристики, что отражено, например, в работе [43].

Уравнения для координат точек образующих линий, выполненных в виде дуг окружностей и эллипса, получим в нормальном сечении зуба, проходящем через межосевой перпендикуляр.

Для прямолинейной образующей линии, применяемой при образовании боковой поверхности зуба, уравнение образующей линии представлено в литературном источнике [123].

Для образующей линии, выполненной в виде дуги окружности и применяемой при образовании боковой поверхности зуба первого колеса, уравнения координат точек образующей линии представляет (рисунок 2.4):

$$X_{A_2B_2} = -r_{w2} + R_2 \cdot \sin \alpha_n - \sqrt{R_2^2 - C^2}, \quad (2.12)$$

$$Y_{A_2B_2} = -z_2 \operatorname{tg}(\Sigma - \beta_{w2})$$

$$Z_{A_2B_2} = z_2$$

где R_2 – радиус окружности, по которой описывается дуга образующей линии;

z_2 – координата точек образующей линии первого зубчатого колеса в системе координат второго зубчатого колеса;

Σ – угол перекрещивания осей;

β_{w2} – угол наклона зуба к оси колеса на начальном гиперboloиде;

α_n – угол зацепления в нормальном сечении зуба, проходящем через межосевой перпендикуляр;

r_{w2} – радиус окружности впадин второго колеса;

C – коэффициент.

Коэффициент C может быть определен из соотношений (рисунок 2.4):

$$C = S' + R_2 \cdot \cos \alpha_n - B, \quad (2.13)$$

где S', B – коэффициенты (рис. 2.4), определяемые по формулам:

$$B = z_2 / \cos \beta_{w2}, \text{ где} \quad (2.14)$$

z_2 – координата образующей линии первого зубчатого колеса в системе координат второго зубчатого колеса;

$$S' = r_{w2} \cdot \sin(180^\circ / 2z_{2k}) \cdot \cos \beta_{w2},$$

где z_{2k} – число зубьев второго зубчатого колес. (2.15)

Целью модификации (при идеальных условиях) является расположение пятна контактов зубьев в середине боковой поверхности зуба как по высоте, так и по его длине. Поэтому точка O'_2 центра окружности, по которой осуществляется модификация профиля зуба должна иметь величину

координаты по оси O_1X_1 больше, чем точка A_2 , иначе пятно контакта сместится к ножке зуба. Поэтому точка A_2 будет всегда ниже горизонтали, проведенной из центра окружности O_2' . Отсюда получим соотношение:

$$R_2 \cdot \sin \alpha_n > m_n \quad (2.16)$$

где m_n – модуль зубчатого колеса в нормальном сечении.

После преобразования получим:

$$R_2 > m_n / \sin \alpha_n \quad (2.17)$$

Для производящей линии, выполненной в виде дуги эллипса при образовании боковой поверхности зуба первого колеса, получим (рисунок 2.5):

$$X_{A_2B_2} = -r_{w2} + r_2 \sin \alpha_n - \sqrt{R_2^2 - (C_2 / \cos(90^\circ - \theta_2))^2} \quad (2.18)$$

$$Y_{A_2B_2} = -z_2 \operatorname{tg}(\Sigma - \beta_{w2})$$

$$Z_{A_2B_2} = z_2, \text{ где}$$

θ_2 – угол между плоскостью, в которой расположена образующая линия дуги эллипса первого колеса и плоскостью, нормальной направлению зуба на начальном гиперboloиде и проходящей через межосевой перпендикуляр;

r_{w2} – радиус окружности впадин второго колеса;

z_2 – координата образующей линии первого зубчатого колеса в системе координат второго зубчатого колеса;

R_2 – большая полуось эллипса второго зубчатого колеса;

C_2 – коэффициент, определим по формуле (рисунок 2.5):

$$C_2 = S' + R_2 \cos(90^\circ - \theta_2) - B, \quad (2.19)$$

где B и S' коэффициенты, определяемые по формулам (2.14) и (2.15) соответственно.

R_2 – малая ось эллипса, определим по формуле (рисунок 2.6):

$$r_2 = R_2 \cdot \cos(90^\circ - \theta_2). \quad (2.20)$$

Для координат точек производящей линии, выполненной дугой окружности и применяемой при образовании боковой поверхности зуба второго колеса, получим следующие уравнения:

$$X_{A_2B_2} = -r_{w1} + R_1 \cdot \sin \alpha_n - \sqrt{R_1^2 - C^2}; \quad (2.21)$$

$$Y_{A_2B_2} = -z_1 \cdot \operatorname{tg}(\Sigma - \beta_{w1});$$

$$Z_{A_2B_2} = z_1, \text{ где}$$

z_1 – координата точек образующей линии второго зубчатого колеса в системе координат первого зубчатого колеса;

R_1 – радиус окружности, по которой описывается дуга образующей линии;

r_{w1} – радиус окружности впадин первого зубчатого колеса;

β_{w1} – угол наклона зуба к оси первого зубчатого колеса на начальном гиперboloиде в нормальном сечении, проходящем через межосевой перпендикуляр;

C и S' – коэффициенты, определяемые по формулам:

$$C = S' + R_1 \cos \alpha_n - B, \quad (2.22)$$

где B – коэффициент, определяемый по формуле:

$$B = z_1 / \cos \beta_{w1}; \quad (2.23)$$

$$S' = r_{w1} \cdot \sin(180^\circ / 2 \cdot z_{1k}) \cdot \cos \beta_{w1}, \quad (2.24)$$

где z_{1k} – число зубьев второго зубчатого колеса.

Для координат точек производящей линии, выполненной в виде дуги эллипса и применяемой при образовании боковой поверхности зуба второго колеса, получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} X_{A_2B_2} &= r_{w1} + R_1 \cdot \sin \alpha_n - \sqrt{R_1^2 - \left(\frac{C_2}{\cos(90^\circ - \theta_1)} \right)^2}; \\ Y_{A_2, B_2} &= -z_2 \cdot \operatorname{tg}(\Sigma - \beta_{w_2}); \\ Z_{A_2, B_2} &= z_2, \end{aligned} \quad (2.25)$$

где C_2 – коэффициент, определяемый по формуле:

$$C_2 = S' + R_1 \cos(90^\circ - \theta_1) - B, \quad (2.26)$$

где θ_1 – угол между плоскостью, в которой расположена образующая линия дуги эллипса второго колеса, и плоскостью, нормальной направлению зуба на начальном гиперboloиде и проходящей через межосевой перпендикуляр; коэффициенты B и S' определяются по формулам (2.23) и (2.24).

станков с ЧПУ необходима геометрическая модель, поэтому произведем построение объемной геометрической модели поверхности зуба гиперboloидного зубчатого колеса двойной кривизны. Компьютерное моделирование произведем на сертифицированном программном обеспечении, используя CAD модуль геометрического моделирования программы Siemens NX.

Для моделирования используем рассчитанные данные точек направляющей линии, образованной движением точки M_1 образующей линии (Приложение 1) и исходные данные моделируемого зубчатого колеса, указанные в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Исходные данные для моделирования зубчатого колеса

Наименование	Обозначение	Значение
Межосевое расстояние, мм	a_w	50,91
Модуль нормальный, мм	m_n	3
Число зубьев	z	12
Нормальный угол зацепления зуба, град	α_n	24°
Угол наклона винтовой линии зубьев, град	β_w	45 ⁰
Направление винтовой линии зубьев	–	правое
Ширина венца, мм	B	40
Радиус делительной окружности гиперboloидного зубчатого колеса, мм	r_2	25,45

Для моделирования кривой (гиперболы) ограничивающей вершины зубьев гиперboloидного зубчатого колеса рассчитаем диаметр окружностей вершин гиперboloидного зубчатого колеса в горловом и торцевом сечениях.

Радиус окружности вершин r_{a1} зубчатого колеса в сечениях $z_i=0$ мм определим по следующей формуле (рисунок 2.7):

$$r_{a1} = a_w - \sqrt{R_3^2 - (z_i')^2}, \quad (2.27)$$

где a_w – межосевое расстояние, мм

R_3 – параметр, определяемый по формуле:

$$R_3 = r_2 - h_a^* \cdot m, \quad (2.28)$$

где h_a^* - коэффициент высоты головки зуба,

m_n – модуль колеса в нормальном сечении, мм

z_i – сечение зуба по оси Z_I , мм

Радиус окружности вершин r_{a1} в сечениях $z_i=20$ мм определим по следующей формуле:

$$r_{a1} = a_w - \sqrt{R_4^2 - (z_i)^2}, \quad (2.29)$$

где R_4 – параметр, определяемый по формуле:

$$R_4 = r_2 + h_f^* \cdot m, \quad (2.30)$$

где r_2 – радиус делительной окружности зубчатого колеса, мм

h_f^* - коэффициент высоты ножки зуба,

h_a^* - коэффициент высоты головки зуба,

m_n – модуль колеса в нормальном сечении, мм

z_i – сечение зуба по оси Z_I , мм

Радиус окружности вершин r_{a1} в сечениях $z_i=20$ мм определим по следующей формуле:

$$r_{a1} = a_w - \sqrt{R_4^2 - (z_i)^2}, \quad (2.31)$$

где R_4 – параметр, определяемый по формуле:

$$R_4 = r_2 + h_f^* \cdot m, \text{ мм}, \quad (2.32)$$

где r_2 – радиус делительной окружности зубчатого колеса

h_f^* - коэффициент высоты ножки зуба

Для моделируемого зубчатого колеса по значениям таблицы 2.1 рассчитаем параметры R_3 , R_4 и радиус окружности вершин r_{a1} в сечениях $z_i = 0$ мм и $z_i = 20$ мм соответственно.

Значения коэффициентов высоты и головки зуба были взяты из [74].

Каноническое уравнение гиперболы имеет вид [140,69,47,12]:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (2.33)$$

где a — действительная (большая) полуось гиперболы; b — мнимая полуось гиперболы.

Расстояние от центра гиперболы до одной из вершин (большой полуоси) равно радиусу окружности вершин гиперболоидного зубчатого колеса в горловом сечении.

Определим из канонического уравнения мнимую полуось гиперболы:

$$b = \frac{y \cdot a}{\sqrt{(x^2 - a^2)}} \quad (2.34)$$

Рассчитаем координаты гиперболы по оси Y_1 и Z_1 . Результаты занесем в таблицу 2.2.

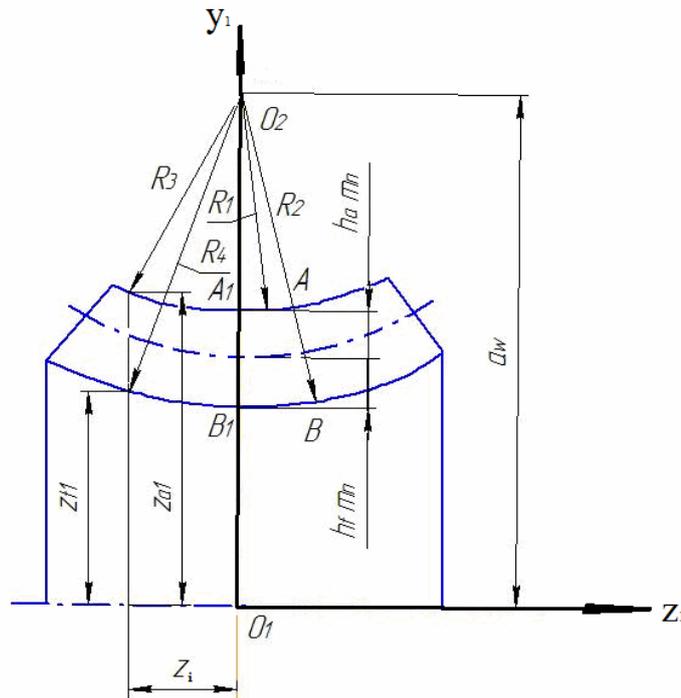


Рисунок 2.6. К расчету окружности вершин зубьев зубчатого колеса.

Так как поверхность гиперболоида вращения симметрична относительно оси y_1 , значения в таблице 2.2 представлены для половины гиперболоида вершин зубьев. По значениям действительной и мнимой полуоси гиперболы в системе автоматизированного проектирования (CAD системе) построим объемную геометрическую модель поверхности вершин зубьев однополостного гиперболоида.

Таблица 2.2. Координаты гиперboloида вершин зубьев

z_i , мм	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y_1 , мм	43,46	43,6	43,83	44,15	44,57	45,07	45,65	46,31	47,05	47,87
z_i , мм	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Y_1 , мм	48,75	49,7	50,71	51,79	52,91	54,09	55,32	56,59	57,9	59,26

Затем, используя рассчитанные по формулам раздела 2.1 значения направляющей зуба, построили геометрическую модель зубчатого колеса (рисунок 2.7). Зацепление смоделированных зубчатых колес анализировалось в модуле Siemens NX «Расширенная симуляция». Кинематический анализ зубчатых пар подтвердил достоверность геометрического моделирования.

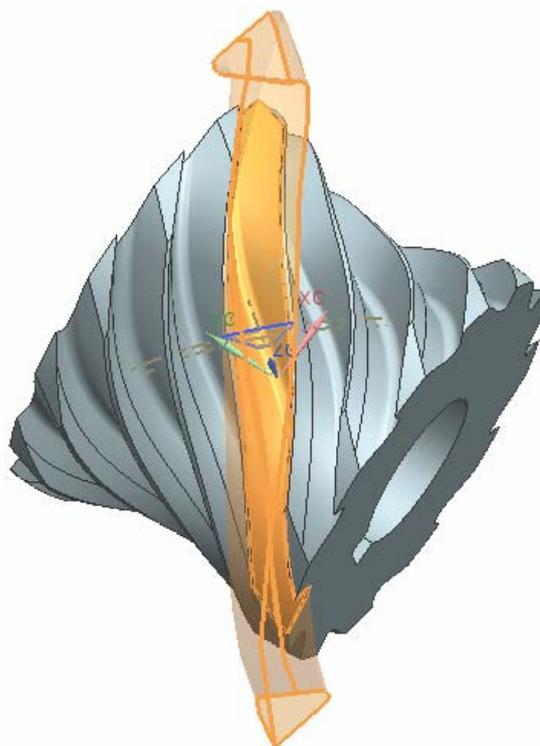


Рисунок 2.7. Геометрическая модель зубчатого колеса.

Для этого через горловое сечение гиперboloида вращения под углом наклона винтовой линии зуба в горловом сечении была проведена плоскость, в которой был сформирован профиль зуба.

Используя операцию CAD модуля Siemens NX «заметание» производящей вдоль рассчитанной направляющей была получена модель зуба, транслируя которую на поверхность гиперболоида с использованием операции «массив», получили геометрическую модель зубчатого колеса (рисунок 2.7)

Выводы по главе:

1. Получены математические зависимости для расчета координат точек образующей линии, позволяющие создавать геометрические модели боковой поверхности зубьев двойной переменной кривизны, форма которых получается движением образующей линии вдоль направляющей.
2. Получены математические зависимости для расчета координат точек образующей линии, выполненных дугами окружности и эллипса и используемых при осуществлении профильной модификации зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны с целью получения высотной локализации пятна контакта зубьев.
3. Получена геометрическая модель гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной переменной кривизны, используемая для пятикоординатного формообразования фрезерованием.

ГЛАВА 3. КИНЕМАТИКА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗУБЬЕВ ПРИ ПЯТИКООРДИНАТНОЙ ОБРАБОТКЕ НА СТАНКАХ С ЧПУ

При формообразовании боковой поверхности зуба зубчатого колеса, нарезаемого на заготовке вида однополостной гиперболоид на универсально-фрезерных станках с ЧПУ, как известно из [122], инструмент и заготовка должны совершать сложное движение: инструмент должен вращаться вокруг своей оси, кроме того, обработка зубьев должна совершаться в условиях изменения межосевого расстояния между осью обрабатываемого и производящего зубчатого колеса от величины, равной величине диаметра начальной окружности обрабатываемого колеса, а затем при расстоянии, равном сумме радиусов начальных окружностей в торцевом и горловом его сечениях, то есть инструмент должен совершать одно вращательное и три поступательных движения: две изменяемые координаты по длине косога зуба и одна изменяемая координата в условиях изменения высоты фрезерования зуба от горлового сечения однополостного гиперболоида вращения к его торцевым сечениям. В свою очередь, заготовка должна вращаться вокруг своей оси и оси воображаемого производящего колеса, то есть совершать два вращательных движения. При обработке на станках с ЧПУ вращение заготовки вокруг оси воображаемого производящего колеса может заменяться дополнительным угловым изменением ориентации оси инструмента в процессе обработки. Таким образом, обработка таких зубчатых колес возможна при реализации на станках с ЧПУ с не менее пяти управляемых координат.

Наличие геометрической модели детали хотя и позволяет на основе применения САМ пакетов разрабатывать управляющие программы для станков с ЧПУ, но, предоставляемые инструментальные средства разработки управляющих программ для многоосевой обработки не позволяют рационально использовать геометрические особенности некоторых классов

поверхностей, в частности боковой поверхности зуба гиперболоидного колеса с зубьями двойной кривизны. Обработка осуществляется построчно радиусной частью инструмента. Для получения высокой точности и качества формообразуемой поверхности существенно возрастает время обработки, так как контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью является точечным.

Производительность фрезерования зубьев можно существенно повысить при обеспечении линейного контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью. Например, модульные пальцевые фрезы при обеспечении стойкости инструмента, позволяют производить выборку удаляемого материала за один проход. При этом, обработку зуба гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны фасонным инструментом система автоматизированной подготовки управляющих программ Siemens NX CAM не позволяет производить вообще – такая возможность появляется только при использовании стратегии обработки с ручным вводом точки трассировки инструмента и вектора ориентации инструмента.

Получение математических зависимостей для ориентации инструмента при формообразовании боковой поверхности зубьев пятикоординатным фрезерованием проведем в два этапа: сначала получим математическую модель боковой поверхности зуба, а затем, используя полученные зависимости, сможем получить математический аппарат, учитывающий геометрию обрабатываемой поверхности для управления ориентацией инструмента при пятикоординатном фрезеровании.

3.1. Расчет геометрии формообразуемой поверхности зубьев при пятикоординатной обработке.

Получение математических зависимостей для определения траектории движения концевой фрезы при пятикоординатной обработке выполним для зубчатого колеса (рисунок 3.1), используя принцип воспроизведения зацепления. Расчет будем осуществлять для образующей линии инструмента

AB , фрагмент которой, при движении, воспроизводящем зацепление сформирует боковую поверхность зуба в процессе резания концевой фрезой.

Начальное положение образующей линии AB задается в сечении, нормальном к направлению боковой поверхности зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр.

Два гиперboloидных колеса, представленные делительными гиперboloидами, находятся в зацеплении и вращаются с угловыми скоростями ω_1 и ω_2 вокруг осей Y_1 и Y_2 соответственно. Рассмотрим кинематику формообразования в относительном движении. Примем колесо 1 и систему координат $X_1Y_1Z_1$ неподвижными. Система координат $X_2Y_2Z_2$ и связанное с ней колесо 2 вращаются вокруг оси Y_1 с постоянной угловой скоростью ω_1 , но в противоположном направлении. Ось Y_2 является осью вращения гиперboloида 2 , вокруг которой он вращается с угловой скоростью ω_2 . Образующая прямая, на которой лежит отрезок AB , вращается совместно с колесом 2 вокруг оси Y_2 и одновременно движется поступательно вдоль оси Y_2 . Поверхность, которую описывает образующая прямая относительно колеса 1 в диапазоне между условными поверхностями, соответствующими вершинам и ножкам зубьев, будет соответствовать боковой поверхности зуба зубчатого колеса.

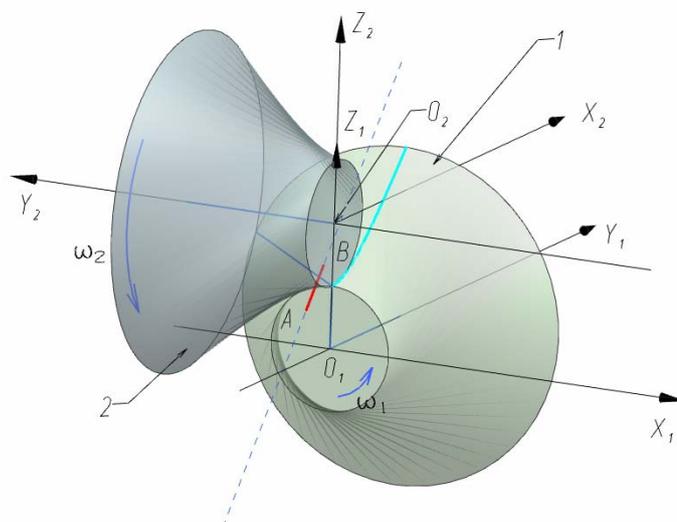


Рисунок 3.1. К расчету ориентации образующей линии

Для расчета положения прямой в любой момент времени, достаточно рассчитать положения двух любых, не совпадающих точек, принадлежащих этой прямой. В качестве этих точек возьмем точки A и B . В начальный момент времени ($t=0$), в системе координат $X_2Y_2Z_2$ вышеуказанные точки имеют координаты $A(x_2^A(0), y_2^A(0), z_2^A(0))$ и $B(x_2^B(0), y_2^B(0), z_2^B(0))$. Движение точек в системе координат $X_2Y_2Z_2$ удобнее представить в цилиндрических координатах, положительное направление угловой координаты выбрано как на рисунке (рисунок 3.2).

Координата точки A в начальный момент времени определится из рисунка.

$$O_2A = r_2^A = \sqrt{(x_2^A(0))^2 + (z_2^A(0))^2} = const, \quad (3.1)$$

где $x_2^A(0)$, $z_2^A(0)$ - координаты точки A по оси X_2 и Z_2 соответственно в начальный период времени, соответствующие начальному положению образующей линии AB .

Аналогично координаты точки B из рисунка в начальный момент времени будут равны:

$$O_2B = r_2^B = \sqrt{(x_2^B(0))^2 + (z_2^B(0))^2} = const, \quad (3.2)$$

где $x_2^B(0)$, $z_2^B(0)$ - координаты точки B по оси X_2 и Z_2 соответственно в начальный период времени

Угловая координата точки A в начальный момент времени будет равна:

$$\varphi_2^A(0) = \arctg\left(\frac{z_2^A(0)}{x_2^A(0)}\right) + \frac{\pi}{1}, \quad (3.3)$$

Аналогично определим угловую координату точки B в начальный момент времени:

$$\varphi_2^B(0) = \arctg\left(\frac{z_2^B(0)}{x_2^B(0)}\right) + \frac{\pi}{1}; \quad (3.4)$$

Угловое положение точки A в период времени t в цилиндрических координатах определим из соотношения:

$$\varphi_2^A = \varphi_2^A(0) + \omega_2 t, \quad (3.5)$$

Аналогично положение точки B в период времени t в цилиндрических

координатах:

$$\varphi_2^B = \varphi_2^B(0) + \omega_2 t \quad (3.6)$$

Координаты точки A при движении относительно оси y определим из соотношения:

$$y_2^A = y_2^A(0) + v_2^y \cdot t \quad (3.7)$$

где v_2^y - скорость движения точки A относительно оси Y_2 .

Аналогично координаты точки B при движении относительно оси y будут равны:

$$y_2^B = y_2^B(0) + v_2^y \cdot t \quad (3.8)$$

Для перехода к декартовой системе координат, используем соответствующие соотношения [69].

Тогда координаты точки A по оси X_2 в декартовой системе координат будут:

$$x_2^A = r_2^A \cdot \cos(\varphi_2^A(0) + \omega_2 t). \quad (3.9)$$

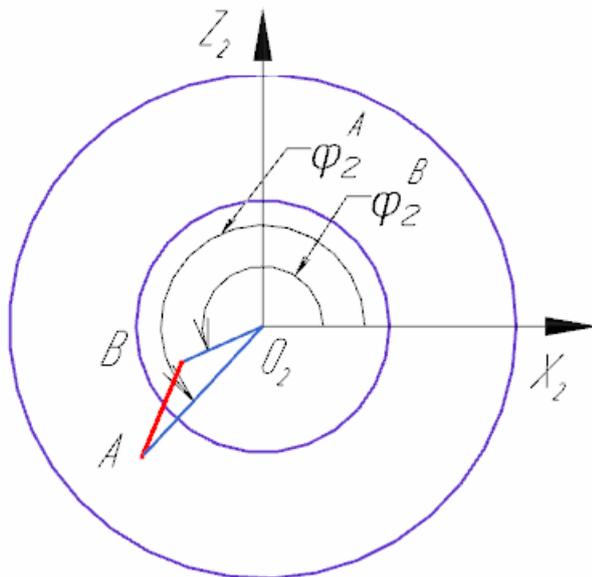


Рисунок 3.2. Угловое положение точек образующей линии в цилиндрической системе координат (ось Y_2 направлена в направлении взгляда)

Координаты точки B по оси X_2 в декартовой системе координат получим по формуле:

$$x_2^B = r_2^B \cdot \cos(\varphi_2^B(0) + \omega_2 t). \quad (3.10)$$

Координаты точки A по оси Z_2 в декартовой системе координат определим по следующей зависимости:

$$z_2^A = r_2^A \cdot \sin(\varphi_2^A(0) + \omega_2 t). \quad (3.11)$$

Координаты точки B по оси Z_2 в декартовой системе определим из соотношения:

$$z_2^B = r_2^B \cdot \sin(\varphi_2^B(0) + \omega_2 t). \quad (3.12)$$

Для определения уравнений координат точек A и B в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$, связанной с колесом 1, учтем следующее:

- 1) Система координат $X_2 Y_2 Z_2$ вращается вокруг оси Y_1 с угловой скоростью ω_1 в направлении, противоположном вращению колеса 1;
- 2) Ось X_2 всегда параллельна оси Y_1 (рассматриваем случай, когда угол скрещивания равен 90° , в общем случае необходимо дополнительно учитывать величину угла);
- 3) Ось Z_2 совпадает по направлению с вектором $O_1 O_2$;

Обозначим угол поворота вектора $O_1 O_2$ относительно оси Z_1 как ψ (рис. 3.3), при этом $\psi = \omega_1 t$.

С учетом вышеизложенного, координаты точки A в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$ будут:

$$\begin{aligned} x_1^A &= O_1 O_2 \cdot \sin(\psi) + z_2^A \cdot \sin(\psi) - y_2^A \cdot \cos(\psi); \\ y_1^A &= x_2^A; \\ z_1^A &= O_1 O_2 \cdot \cos(\psi) + z_2^A \cdot \cos(\psi) + y_2^A \cdot \sin(\psi). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Тогда координаты точки B в системе координат $X_1 Y_1 Z_1$ определяются:

$$\begin{aligned} x_1^B &= O_1 O_2 \cdot \sin(\psi) + z_2^B \cdot \sin(\psi) - y_2^B \cdot \cos(\psi); \\ y_1^B &= x_2^B; \\ z_1^B &= O_1 O_2 \cdot \cos(\psi) + z_2^B \cdot \cos(\psi) + y_2^B \cdot \sin(\psi). \end{aligned} \quad (3.14)$$

Каждая из вышеприведенных координат является функцией параметра t .

Координаты двух точек, принадлежащих образующей линии, дадут ее уравнение:

$$\frac{x_1 - x_1^A}{l} = \frac{y_1 - y_1^A}{m} = \frac{z_1 - z_1^A}{n}, \quad (3.15)$$

где направляющие векторы l, m, n определяются по формулам:

$$l = \frac{x_1^A - x_1^B}{\sqrt{(x_1^A - x_1^B)^2 + (y_1^A - y_1^B)^2 + (z_1^A - z_1^B)^2}}; \quad (3.16)$$

$$m = \frac{y_1^A - y_1^B}{\sqrt{(x_1^A - x_1^B)^2 + (y_1^A - y_1^B)^2 + (z_1^A - z_1^B)^2}}; \quad (3.17)$$

$$n = \frac{z_1^A - z_1^B}{\sqrt{(x_1^A - x_1^B)^2 + (y_1^A - y_1^B)^2 + (z_1^A - z_1^B)^2}} \quad (3)$$

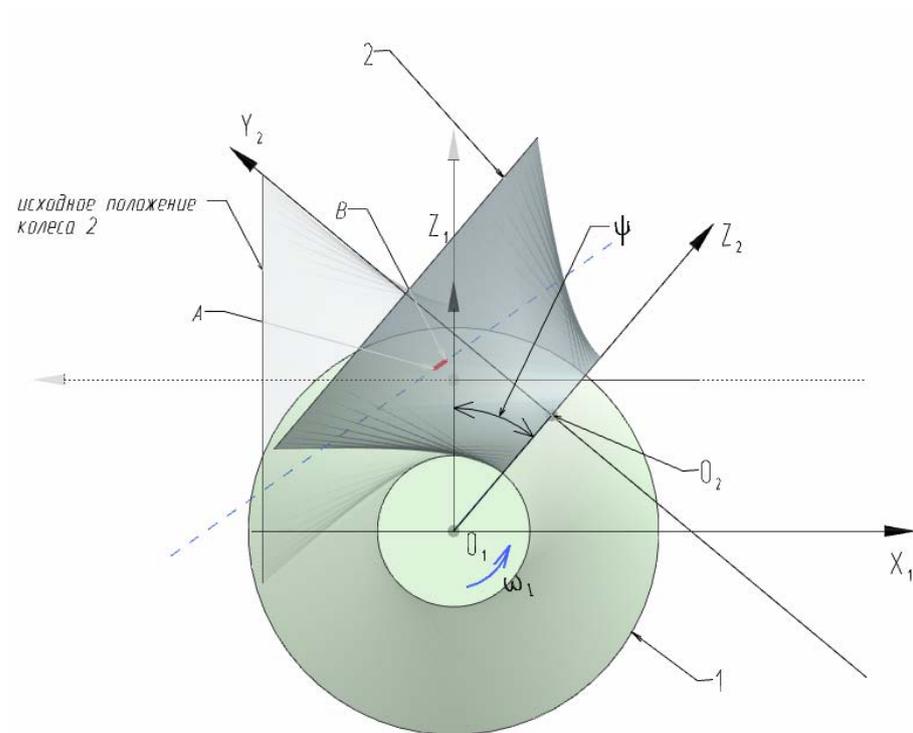


Рис.3.3. Поворот колеса 2, связанного с образующей линией в относительном движении

Уравнение гиперболы, вращением которой вокруг оси Y_1 образуется делительный гиперboloид первого колеса, имеет вид:

$$\frac{z_1^2}{a^2} - \frac{y_1^2}{b^2} = 1 \quad (3.19)$$

Формировать профиль зубьев будет только участок образующей линии, лежащий между поверхностями гиперboloидов, соответствующих вершинам и ножкам зубьев.

Если в горловом сечении диаметр делительного гиперboloида равен $2a$, с одной стороны и m_0z - с другой, где a - действительная ось гиперболы, m_0 – модуль в горловом сечении, z – число зубьев.

Тогда диаметр зубчатого колеса определим по следующей формуле:

$$D^1(y_1) = 2 \left(1 + \frac{y_1^2}{b^2} \right) a^2; \quad (3.20)$$

Окружной модуль зубчатого колеса определим в соответствии с уравнением:

$$m^1(y_1) = D^1(y) / z. \quad (3.21)$$

Для поверхностей, соответствующих головкам зубьев, диаметры в заданном сечении $y_I(t)$ определим по зависимости:

$$D_a^1(y_1) = D^1(y) + 2 \cdot h_a^* \cdot m^1(y), \quad (3.22)$$

где h_a^* – высота головки зуба, $m_I(y)$ – модуль по длине зуба

Для поверхностей, соответствующих ножкам зубьев диаметры в заданном сечении $y_I(t)$ определяются:

$$D_f^1(y_1) = D^1(y) + 2 \cdot h_f^* \cdot m^1(y), \quad \text{где} \quad (3.23)$$

h_f^* – высота головки зуба

Для образующей линии рассчитываются две точки с положительным значением координаты z_I , удовлетворяющих условию (3.23), (3.22). В общем случае точки образующей линии имеют различные координаты y .

Максимальная длина образующей линии AB (рис. 3.4) при обработке боковой поверхности концевой фрезой, должна быть меньше длины режущей кромки инструмента. Процесс резания должен осуществляться таким образом, чтобы фреза работала на растяжение. Точка A лежит на вершине зуба, точка B – на ножке зуба.

3.2. Определение ориентации инструмента при пятикоординатной обработке зубьев

Траекторию движения точки трассировки инструмента и ориентацию инструмента необходимо определить в каждой точке траектории (рисунок 3.5).

Зададимся условием, что по линии, соответствующей ножке зуба (точка B), фреза должна работать заданным диаметром d_B . Тогда, с учетом геометрии инструмента и положения образующей линии можно будет рассчитать положение точки трассировки инструмента и ориентацию оси инструмента.

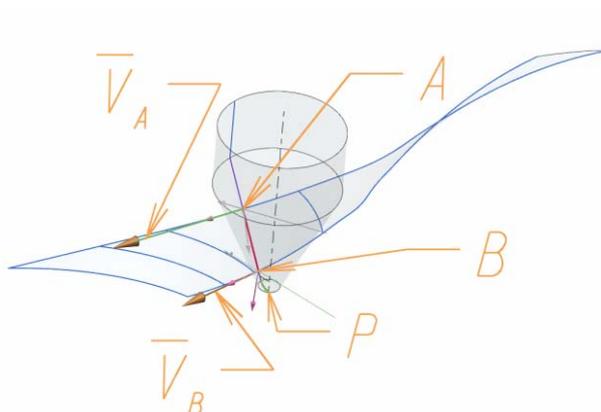


Рисунок 3.4. К расчету траектории движения инструмента

Уравнения движения прямой (3.15), образуют линейчатую поверхность:

$$\frac{x_1(t) - x_1^A(t)}{l(t)} = \frac{y_1(t) - y_1^A(t)}{m(t)} = \frac{z_1(t) - y_1^A(t)}{n(t)}, \quad (3.24)$$

Для $t=0$ определяются начально-заданные точки образующей линии, формирующей боковую поверхность зуба колеса 1. Начальное положение точек образующей линии AB задается в сечении, нормальном к направлению боковой поверхности зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр.

Остальные точки рассчитываются при изменении параметра t . Расчет должен осуществляться с изменением параметра, как в положительном, так и отрицательном направлении. Из всей рассчитанной поверхности боковую

поверхность зуба будут формировать участки, ограниченные поверхностями вращения, формирующими вершины и ножки зубьев.

Уравнение делительного гиперболоида имеет вид:

$$\frac{x_1^2}{a^2} + \frac{z_1^2}{a^2} - \frac{y_1^2}{b^2} = 1 \quad (3.25)$$

Для окружного модуля зуба в горловом сечении m_n справедливо соотношение:

$$m_n(0) = \frac{D(y=0)}{z_1^*} = \frac{2a}{z}, \text{ где} \quad (3.26)$$

z_1 – координата, z_1^* – число зубьев колеса L , a – действительная полуось гиперболы, b – мнимая полуось гиперболы.

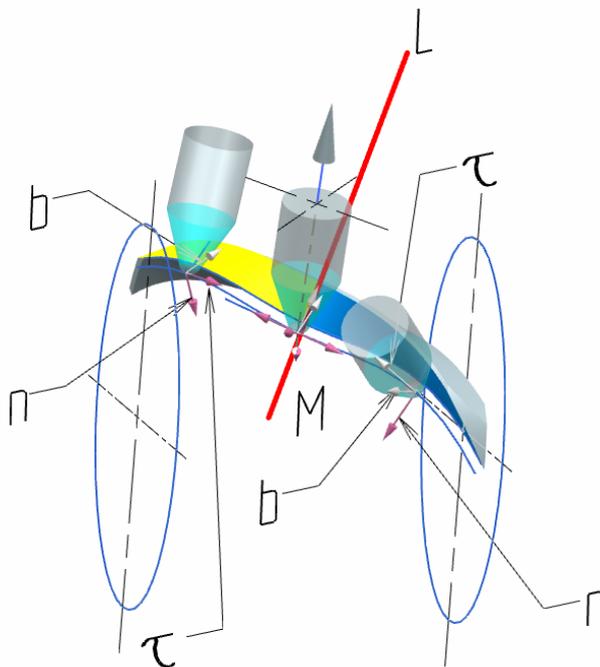


Рисунок 3.5. К расчету траектории движения инструмента и ориентации инструмента: LM – образующая линия, τ – орт-вектор касательной, n – орт-вектор нормали, b – орт вектор бинормали.

Окружной модуль $m(y)$ в произвольном сечении будет определяться соотношением:

$$m(y) = \frac{D_1(y)}{z_1^*} = \frac{2a_1 \sqrt{1 + \frac{y^2}{b^2}}}{z_1^*} = \frac{2x_1(y_1)}{z_1^*} \quad (3.27)$$

Высота ножки зуба определяется соотношением [74]:

$$h_f^* = 1,25m \quad (3.28)$$

В свою очередь высота головки зуба будет равна:

$$h_a^* = m \quad (3.29)$$

Следовательно, боковая поверхность зуба, формируемая движением образующей линии, будет ограничиваться двумя поверхностями вращения.

Для ножек зубьев получим уравнение поверхности вращения по следующей формуле:

$$\frac{\left(x_1 + \frac{2,5x_1}{z_1^*}\right)^2}{a_1^2} + \frac{\left(z_1 + \frac{2,5z_1}{z_1^*}\right)^2}{a_1^2} - \frac{y_1^2}{b_1^2} = 1 \quad (3.30)$$

После преобразования уравнение (3.30) примет вид:

$$(x_1^2 + z_1^2) \cdot \frac{\left(1 + \frac{2,5}{z_1^*}\right)^2}{a_1^2} - \frac{y_1^2}{b_1^2} = 1 \quad (3.31)$$

Для вершин зубьев уравнение поверхности вращения, ограничивающей боковую поверхность зуба будет иметь вид:

$$(x_1^2 + z_1^2) \cdot \frac{\left(1 - \frac{2}{z_1^*}\right)^2}{a_1^2} - \frac{y_1^2}{b_1^2} = 1 \quad (3.32)$$

Для нахождения линий пересечения поверхностей, ограничивающих боковую поверхность зуба с поверхностью, формируемой образующей линией, приравняем уравнение (3.24) параметру t_1 , определяющему ориентацию образующей линии.

$$\frac{x_1(t) - x_1^B(t)}{l(t)} = \frac{y_1(t) - y_1^B(t)}{m(t)} = \frac{z_1(t) - z_1^B(t)}{n(t)} = t_1, \quad (3.33)$$

где x_1^B, y_1^B – координаты точки B .

После преобразования получим:

$$\begin{aligned}x_1(t) &= x^B(t) + t_1 \cdot l(t) \\y_1(t) &= y_1^B(t) + t_1 \cdot m(t) \\z_1(t) &= z_1^B(t) + t_1 \cdot n(t)\end{aligned}\tag{3.34}$$

Зависимости (3.33) подставим поочередно в (3.31) и (3.32), получив два уравнения, решения которых и дадут возможность определить линии вершин и ножек зубьев. При фиксированном значении t_1 , решение дает точку пересечения образующей линии с соответственно поверхностями (3.31) и (3.32).

Тогда уравнение вершин зубьев будет определять уравнение:

$$\left((x_1^B(t) + t_1 \cdot l_1(t))^2 + (z_1^B(t) + t_1 \cdot n_1(t))^2 \right) \cdot \frac{\left(1 + \frac{2,5}{z_1^*} \right)^2}{a_1^2} - \frac{(y_1^B(t) + t_1 \cdot m(t))^2}{b^2} = 1\tag{3.35}$$

После преобразования уравнения (3.35) получим:

$$\begin{aligned}& \left((x_1^B(t))^2 + 2x_1^B(t) \cdot t_1 \cdot l_1(t) + t_1^2 \cdot (l_1(t))^2 + (z_1^B(t))^2 + 2z_1^B(t) \cdot t_1 \cdot n_1(t) + \right. \\& \left. + t_1^2 \cdot (n_1(t))^2 \right) \cdot \frac{\left(1 + \frac{2,5}{z_1^*} \right)^2}{a_1^2} - \frac{1}{b^2} \left((y_1^B(t))^2 + 2y_1^B(t) \cdot t_1 \cdot (m_1(t))^2 \right) - 1 = 0\end{aligned}\tag{3.36}$$

Таким образом, уравнение (3.36) приводится к виду квадратного уравнения: $a^B \cdot t_1^2 + b^B \cdot t_1 + c^B = 0$, имеющего два решения. Если образующая линия касательная к линии головок или ножек зубьев, то получим два совпадающих решения.

Из полученных двух решений интерес представляет только решение, соотносимое с обрабатываемым зубом (находящееся ближе к инструментальному магазину станка). Координаты точек пересечения будут получены подстановкой решения t_1 в (3.33). Получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned}x_1^B(t, t_1) &= x_1^B(t) + t_1^B(t) \cdot l(t) \\y_1^B(t, t_1) &= y_1^B(t) + t_1^B(t) \cdot m(t) \\z_1^B(t, t_1) &= z_1^B(t) + t_1^B(t) \cdot n(t)\end{aligned}\tag{3.37}$$

Аналогичное решение получим при пересечении поверхности, формируемой образующей линией с поверхностью вершин зубьев:

$$((x_1^A(t) + t_1 \cdot l_1(t))^2 + ((z_1^A(t) + t_1 \cdot n_1(t))^2 \cdot \frac{\left(1 - \frac{2}{z_1^*}\right)^2}{a_1^2} - \frac{(y_1^A(t) + t_1 \cdot m(t))^2}{b^2} = 1 \quad (3.38)$$

После решения квадратного уравнения, выбора решения, соотносящегося с вершиной обрабатываемого зуба и, после подстановки решения в (3.33) получим координаты второй точки образующей линии:

$$\begin{aligned} x_1^A(t, t_1) &= x_1^A(t) + t_1^A(t) \cdot l(t) \\ y_1^A(t, t_1) &= y_1^A(t) + t_1^A(t) \cdot m(t) \\ z_1^A(t, t_1) &= z_1^A(t) + t_1^A(t) \cdot n(t) \end{aligned} \quad (3.39)$$

Расчет траектории движения точки трассировки инструмента и вектор его ориентации будем производить через уравнения образующей линии и точки ее пересечения с гиперboloидами вершин и ножек зубьев A и B соответственно (рисунок 3.6).

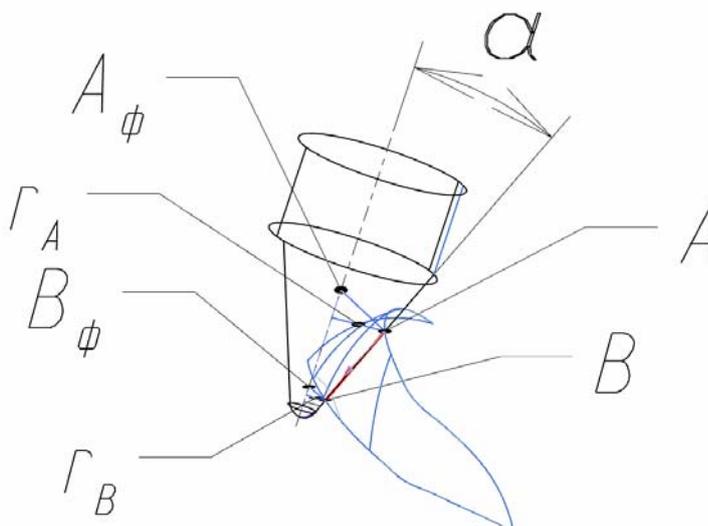


Рис. 3.6. К расчету траектории и ориентации концевой фрезы
 r_a – радиус инструмента в точке A , r_b – радиус инструмента в точке B ,
 α – угол наклона фрезы

Фреза касается боковой режущей поверхностью обрабатываемого зуба и движется вдоль поверхности зуба по сложной траектории. Чтобы определить

положение оси вращения фрезы относительно обрабатываемой поверхности, необходимо определить положение двух точек, принадлежащих оси фрезы. Таким образом, известны две точки контакта образующей линии инструмента A и B и боковой поверхности зуба, известно уравнение боковой поверхности зуба, а также уравнения поверхностей, ограничивающих боковую поверхность по вершинам и ножкам зубьев. Точки, принадлежащие оси фрезы, будут лежать на нормалях к боковой поверхности зуба, проведенных из точек A и B . Направление нормалей в этих точках определим через векторные произведения к касательным к линиям головок и ножек зубьев соответственно для точек A и B на вектор BA .

Касательная к линии ножек зубьев определится по соотношениям:

$$\frac{dx_1^B}{dt} = \frac{d}{dt} (O_1 O_2 \cdot \sin(\omega_1 t) + r_0^B \cdot \sin(y_1^B(0) + \omega_2 t)) \cdot \sin(\omega_1 t) - (y_2^B(0) + V_2^y \cdot t) = \quad (3.40)$$

$$= O_1 O_2 \cdot \omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^B (\omega_2 \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t)) \cdot \sin(\omega_1 t) + \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot (\omega_1 \cdot \cos(\omega_1 t)) - V_2^y$$

$$\frac{dy_1^B}{dt} = \frac{d}{dt} (r_2^B \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t)) = -r_2^B \cdot \omega_2 \cdot \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t)$$

$$\frac{dz_1^B}{dt} = \frac{d}{dt} (O_1 O_2 \cdot \cos(\omega_1 t) + r_2^B \cdot \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t)) \cdot \cos(\omega_1 t) + (y_2^B(0) + V_2^y \cdot t) =$$

$$= -O_1 O_2 \cdot \omega_1 \cdot \sin(\omega_1 t) + r_2^B (\omega_2 \cdot \cos(y_2^B(0) + \omega_2 t)) \cdot \cos(\omega_1 t) + \omega_1 \sin(y_2^B(0) + \omega_2 t) \cdot (-\sin(\omega_1 t)) - V_2^y,$$

где $y_1^B(0)$, $y_2^B(0)$ – координаты точки B в системах координат $O_1 X_1 Y_1 Z_1$

и $O_2 X_2 Y_2 Z_2$,

r_2^B - радиус инструмента в точке B .

Единичный вектор, касательный к линии ножек зубьев, будет равен:

$$\vec{\tau}_1^B = \frac{\frac{dx_1^B}{dt} \cdot \vec{i}_1 + \frac{dy_1^B}{dt} \cdot \vec{j}_1 + \frac{dz_1^B}{dt} \cdot \vec{k}_1}{\sqrt{\left(\frac{dx_1^B}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_1^B}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz_1^B}{dt}\right)^2}} = \frac{\frac{dx_1^B}{dt} \cdot \vec{i}_1 + \frac{dy_1^B}{dt} \cdot \vec{j}_1 + \frac{dz_1^B}{dt} \cdot \vec{k}_1}{k^B} \quad (3.41)$$

где k_B –касательная к линии ножек зуба.

Нормаль к боковой поверхности зуба в точке B определим по соотношению:

$$\left[\frac{\overline{BA}}{|\overline{BA}|} \times \tau^{-B} \right] = \begin{vmatrix} \vec{i}_1 & \vec{j}_1 & \vec{k}_1 \\ \frac{x_1^A - x_1^B}{|\overline{BA}|} & \frac{y_1^A - y_1^B}{|\overline{BA}|} & \frac{z_1^A - z_1^B}{|\overline{BA}|} \\ \frac{dx_1^B}{k^B dt} & \frac{dy_1^B}{k^B dt} & \frac{dz_1^B}{k^B dt} \end{vmatrix} = N_x^B \cdot \vec{i} + N_y^B \cdot \vec{j} + N_z^B \cdot \vec{k} \quad (3.42)$$

Зная координаты рассчитанного вектора и радиус фрезы в заданном сечении, рассчитываем координаты точки B_ϕ , лежащей на оси вращения фрезы в направлении рассчитанного вектора. Расстояние до оси вращения фрезы будет определять точку, принадлежащую оси фрезы:

$$\overline{BB_\phi} = \frac{r_B^\phi}{\cos \alpha} (N_x^B \cdot \vec{i} + N_y^B \cdot \vec{j} + N_z^B \cdot \vec{k}) \quad (3.43)$$

Аналогичный подход позволит определить вторую точку, принадлежащую оси фрезы:

$$\overline{AA_\phi} = \frac{r_A^\phi}{\cos \alpha} (N_x^A \cdot \vec{i} + N_y^A \cdot \vec{j} + N_z^A \cdot \vec{k}) \quad (3.44)$$

Радиус фрезы в точке A определим по зависимости:

$$r_A^\phi = r_B^\phi + |\overline{AB}| \cdot \sin \alpha,$$

где r_B^ϕ - радиус инструмента в точке B ,

α -угол наклона фрезы.

Данные соотношения позволят определить координаты двух точек A_ϕ и B_ϕ , принадлежащих оси вращения фрезы. Вектор $\overline{B_\phi A_\phi}$ определит ориентацию инструмента в системе координат обрабатываемого колеса.

Вектор $\overline{B_\phi A_\phi}$ определим через соотношение:

$$\overline{B_\phi A_\phi} = (x^{A\phi} - x^{B\phi})\vec{i} + (y^{A\phi} - y^{B\phi})\vec{j} + (z^{A\phi} - z^{B\phi})\vec{k} \quad (3.45)$$

Координаты точки трассировки однозначно определяются точкой P , лежащей на оси инструмента и смещенной от точки B_ϕ на постоянную

величину, определяемую геометрией инструмента (расстояние $B_{\phi}P$) в направлении, противоположном направлению вектора. Таким образом, имеем траекторию движения точки трассировки инструмента P , а также вектор, определяющий ориентацию инструмента в каждой \bar{n} точке траектории. Координаты угла ориентации инструмента и точки трассировки позволяют получить управляющую программу для станка с ЧПУ, где дополнительно требуется учесть технологические параметры и режимы обработки, а также геометрию маневрирования. Рассчитанная траектория позволит более рационально использовать фактические геометрические свойства поверхности зуба при обработке, что существенно сократит время обработки и позволит при этом достичь максимальной точности и производительности по сравнению с располагаемыми САМ системами инструментальными средствами разработки управляющих программ по 3D моделям деталей. Для черновых этапов обработки, при выборке массива материала возможно использовать эти же результаты расчета, смещая инструмент в направлении вектора на величину оставляемого припуска под последующий этап обработки.

Если длина BA превышает длину режущей кромки фрезы, то обработка должна вестись построчно. Точка трассировки при этом отдалается от расчетной в направлении вектора BA на величину, обеспечивающую удаление заданного слоя, при обработке каждой следующей строки фреза движется в направлении расчетной линии трассировки в направлении обратном направлению вектора BA .

Данный математический аппарат позволяет непосредственно программировать обработку гиперболических зубчатых колес с зубьями двойной кривизны с помощью перекодирующей программы непосредственно по геометрическим параметрам гиперболического колеса. По полученным зависимостям для станка с ЧПУ без использования систем автоматизированной подготовки управляющих программ (САМ-систем) может быть запрограммирована макро-программа, учитывающая параметры колеса, параметры фрезы и технологические режимы.

Необходимым условием на ограничение геометрии инструмента будет проверка, что инструмент не интерферирует с соседним зубом при обработке боковой поверхности обрабатываемого зуба.

Алгоритм подготовки управляющей программы с учетом предложенной кинематики формообразования зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны следующий:

1. По математической зависимости (3.45) определяется вектор ориентации инструмента
2. По математической зависимости (3.43) определяются координаты точки B_ϕ лежащей на оси вращения фрезы.
3. Рассчитываются координаты точки трассировки B (рисунок 3.6) с учетом геометрических параметров инструмента.
4. Рассчитанные траектория движения точки трассировки и годограф (вектор), определяющие ориентацию инструмента в каждой точке, вводятся в программу Siemens NX CAM в стратегию обработки, поддерживающую ввод текстового файла с координатами сплайна.

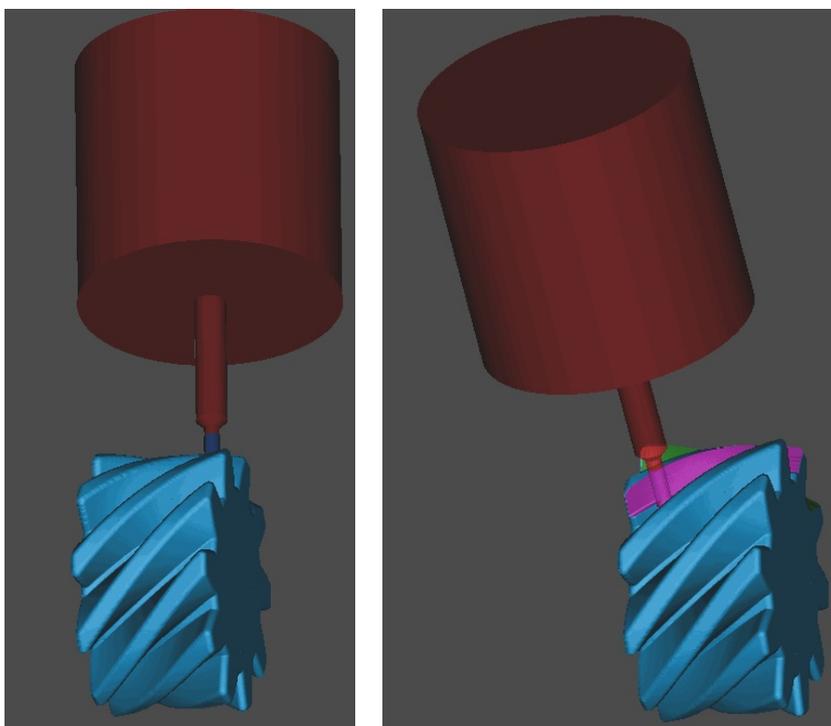


Рис. 3.7. Изменение ориентации инструмента в процессе реализации предложенной кинематики формообразования зубьев

После ввода данных траектории движения точки трассировки инструмента и вектора, определяющего его положение, инструмент при обработке ориентируется с учетом геометрии боковой поверхности зуба. Результат ориентирования инструмента после расчета и ввода данных в САМ-систему представлен на рисунке 3.7.

Выводы по главе:

1. Разработана математическая модель управления угла ориентации оси инструмента на пятикоординатном станке с ЧПУ, позволяющая производить обработку боковой поверхности зуба при формообразовании гиперboloидных зубчатых колес двойной переменной кривизны. Полученная математическая модель позволяет осуществлять обработку зубьев гиперboloидных зубчатых колес двойной переменной кривизны с использованием непосредственного ввода данных в станок с ЧПУ без использования систем подготовки управляющих программ.
2. Изложен алгоритм расчета и ввода полученных значений вектора ориентации и координат точек трассировки инструмента в программное обеспечение для подготовки управляющих программ при реализации разработанной кинематики формообразования зубьев.
3. Разработана математическая модель геометрии формообразуемой боковой поверхности зуба, включающая в себя определение поверхности, полученной движением следа режущей кромки инструмента при чистовой обработке и определение поверхностей, ограничивающих линии головок и ножек зубьев.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЗУБЬЕВ

4.1. Разработка способа предварительного фрезерования зубьев модульными пальцевыми и дисковыми фрезами.

Из-за переменного окружного шага и модуля гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны профиль зуба нарезаемого зубчатого колеса соответствует профилю инструмента только в одном горловом сечении зуба нормальном к направлению зуба А-А [123] (рис. 4.2). Окончательная боковая поверхность зуба в зависимости от реализуемого профиля зуба образуется методом построчного снятия припуска концевой фрезой, либо фасонным концевым инструментом. При этом производительность обработки зубьев концевой фрезой низкая, из-за того, что контакт инструмента и обрабатываемой заготовки точечный. Производительность можно повысить за счет использования для черновой прорезки впадины зуба модульных дисковых фрез, снимающих больший объем металла, оставляя припуск под окончательную обработку. При использовании модульных пальцевых фрез производительность чернового фрезерования будет также выше, так как фрезой (при соблюдении условия обеспечения стойкости инструмента) припуск снимается за один проход.

Для сокращения номенклатуры режущего инструмента, работающего методом копирования, используются наборы из модульных дисковых или пальцевых фрез, позволяющих нарезать зубчатые колеса с определенным числом зубьев [83].

Для нарезания профилей прямозубых зубчатых колес модульная дисковая или пальцевая фреза выбирается исходя из числа зубьев колеса нарезаемого таким инструментом, для косозубых колес фрезы выбираются исходя из приведенного числа зубьев [74], определяемого по соответствующей формуле.

Ввиду отсутствия математической зависимости для определения приведенного числа зубьев, используемой для выбора зуборезного модульного инструмента при формообразовании зубьев гиперболоидной зубчатой передачи, необходимости осуществления соответствующих движений формообразования для нарезания зубьев был предложен соответствующий способ обработки зубьев и математическая зависимость для выбора приведенного числа зубьев для обработки гиперболоидных зубчатых колес.

Рассмотрим профиль зуба зубчатого колеса.

При рассмотрении геометрии зуба получим следующее геометрическое соотношение:

$$(\rho_a)^2 + (r_b)^2 = (r_a)^2, \quad (4.1)$$

где r_b – радиус основной окружности; r_a – радиус окружности вершин; ρ_a – радиус кривизны образующей зуба на высоте головки зуба.

Радиус начальной окружности определим по зависимости:

$$r_a = r + h_a^* \cdot m, \quad (4.2)$$

Где r – радиус начальной окружности; h_a^* – высота головки зуба

Определим радиус основной окружности [74]:

$$r_b = r \cos \alpha^*, \quad (4.3)$$

где α^* – угол зацепления в нормальном сечении зуба, проходящим через горловое сечение зуба зубчатого колеса.

В результате преобразований формул (4.1), (4.2) и (4.3) получим следующую математическую зависимость:

$$(r + h_a^*)^2 = (\rho_a)^2 + (r \cos \alpha^*)^2, \quad (4.4)$$

Проведя элементарные математические преобразования формулы (4.4), получим:

$$r^2 + 2r h_a^* + (h_a^*)^2 = (\rho_a)^2 + r^2 (\cos \alpha^*)^2, \quad (4.5)$$

После переноса правой части уравнения в левую и преобразований уравнение (4.5) примет вид:

$$r^2(1-(\cos \alpha^*)^2) + 2r h_a^* - ((\rho_a)^2 - (h_a^*)^2) = 0, \quad (4.6)$$

Очевидно, что для станочного зацепления нарезаемого колеса с инструментом реечного типа шаг p исходного контура должен разместиться на длине делительной окружности ровно z раз. Отсюда получим:

$$\pi d = zp, \quad (4.7)$$

где d – диаметр начальной окружности, z – число зубьев нарезаемого колеса.

Так как модуль зубчатого колеса определяется по соотношению [58]:

$$m = p/\pi \quad (4.8)$$

$$\text{то } d = mz, \text{ а } r = mz/2 \quad (4.9)$$

Преобразовав выражение (4.6) и с учетом (4.9) получим:

$$(m^2 z^2 / 4) (1 - (\cos \alpha^*)^2) + mz h_a^* - ((\rho_a)^2 - (h_a^*)^2) = 0, \quad (4.10)$$

Вынося параметр z^2 за скобку получим следующую зависимость:

$$z^2 ((m^2/4)(1 - (\cos \alpha^*)^2)) + z(m h_a^*) - ((\rho_a)^2 - (h_a^*)^2) = 0. \quad (4.11)$$

Решив квадратное уравнение, выразив значение числа зубьев z и введя

коэффициенты квадратного уравнения A, B, C получим:

$$z_{\text{пр}} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}, \quad (4.12)$$

$$\text{где } A = m^2/4(1 - (\cos \alpha^*)^2), \quad (4.13)$$

$$B = m h_a^*, \quad (4.14)$$

$$C = h_a^{*2} - \rho_a^2 \quad (4.15)$$

Приведенный радиус эвольвенты определяется по формуле:

$$\rho_a = \frac{T \cdot 7 \cdot 10^4}{d_a \cdot b \cdot \varepsilon \cdot [\sigma_H]^2}, \quad (4.16)$$

где T – крутящий момент, приложенный к колесу;

d_a – диаметр окружности вершин в горловом сечении зубчатого колеса;

b – ширина колеса;

ε – коэффициент перекрытия, округленный до меньшего целого числа;

$[\sigma_H]$ – допускаемые контактные напряжения.

Рассчитанное приведенное число зубьев округляют до ближайшего целого числа и по полученному приведенному числу выбирают модульную пальцевую или дисковую фрезу, которой и производят предварительную механическую обработку зубьев.

Для осуществления нарезания зубьев обрабатываемому колесу 1 и инструменту 2 сообщают формообразующие движения: вращательные движения вокруг своих осей O_1-O_1 и O_2-O_2 с угловыми скоростями $\omega_{к1}$ и $\omega_{ф}$ соответственно (рисунок 4.1) Кроме того, колесу 1 сообщают дополнительное вращение с угловой скоростью $\omega_{ПК}$ вокруг оси O_3-O_3 воображаемого производящего колеса.

Пример расчета и выбора модульного зуборезного инструмента для обработки гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны приведен в [125].

Обработку зубьев по предлагаемому способу необходимо производить при различных межосевых расстояниях между обрабатываемым 1 и воображаемым производящим 3 колесами, сначала при расстоянии, равном диаметру начальной окружности обрабатываемого колеса 1 в горловом его сечении, а затем при расстоянии, равном сумме радиусов начальных окружностей в его горловом и торцевых сечениях. Ось инструмента 2 O_3-O_3 необходимо устанавливать под углом $90^\circ - \beta$ к оси к оси обрабатываемого колеса 1, где β – угол наклона зубьев обрабатываемого гиперболоидного колеса 1 к его оси на начальном гиперболоиде в сечении А-А, перпендикулярном к направлению зуба и проходящем через межосевой перпендикуляр М-М. Инструмент 2 устанавливают симметрично относительно межосевого перпендикуляра М-М, а при переходе от обработки одной впадины к другой, обрабатываемое колесо поворачивают на угол деления, равный $360^\circ/z_1$, где z_1 – количество зубьев обрабатываемого колеса 1.

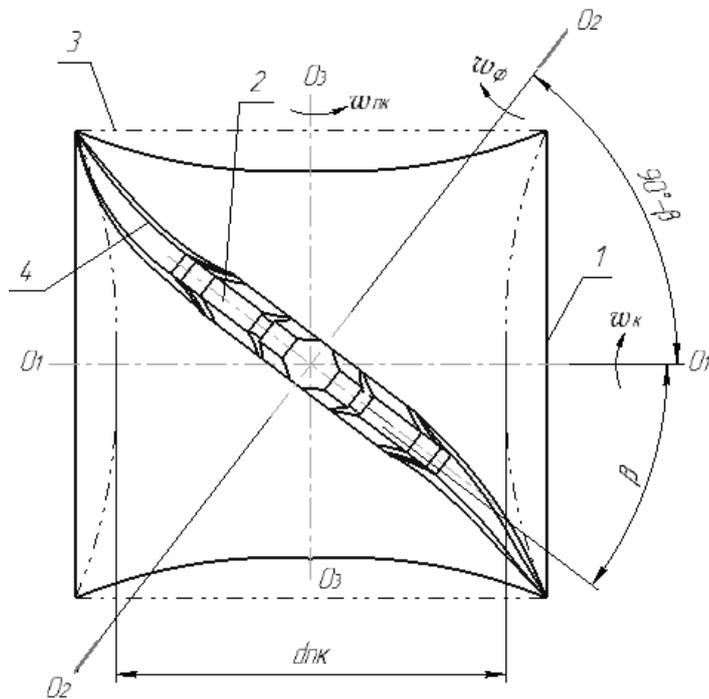


Рисунок 4.1. Схема формообразования зубьев

1-формообразуемое зубчатое колесо; 2 – фреза; 3- производящее зубчатое колесо

Переменность профиля зуба по его высоте, шага и модуля зацепления в различных сечениях зубьев колес обеспечивается на чистовом зубофрезеровании.

На способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны модульными зуборезными фрезами получен патент на изобретение № 2341357.

В производственных условиях для предварительной обработки зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны согласно полученному патенту 2341357 на станке с ЧПУ можно воспользоваться уже готовыми решениями, например, фрезами Sandvik: Coromill 171, Coromill 172, Coromill 161, или Coromill 162. Однако, готовые фрезы Sandvik: Coromill 171 и другие подобные фрезы достаточно дороги, и поэтому, их не всегда целесообразно применять для предварительного формообразования зубьев. Именно поэтому была разработана специальная оправка для дисковой модульной фрезы, устанавливаемая в станок с ЧПУ.

Для оценки возможности использования такой оправки на станке с ЧПУ необходимо произвести ряд расчетов. Произведем расчет для предварительного формообразования зубчатого колеса (исходные данные зубчатого колеса – таблица 2.1) дисковой модульной фрезой. Выбор дисковой модульной фрезы из набора фрез осуществляем по формуле 4.12. Геометрические размеры модульной дисковой фрезы берем из ОСТ 2И41-174-87 [121]. Материал зубчатого колеса – сталь 45, твердость по ГОСТ 1050-88 без термической обработки $HV \leq 229$.

Подачу на зуб фрезы определим по справочным картам [118] как для дисковой фрезы с учетом поправочных коэффициентов на твердость обрабатываемого материала, вылета оправки, числа зубьев фрезы и формы обрабатываемой поверхности.

Назначим по нормативным материалам – справочным таблицам из [10] подачу на зуб $S_z = 0,12$ мм/зуб.

Скорость резания и частота вращения шпинделя при нарезании зубьев дисковыми фрезами для стали 45 возьмем их таблицы 13.16 [119]. При обработке зубьев модуля до четырех и диаметра инструмента до 80 мм скорость резания примем равной $v_1 = 32$ м/мин, частоту оборотов шпинделя $n_1 = 127$ об/мин.

Минутная подача будет равна: $S_M = S_z \cdot z \cdot n = 183$ мм/мин.

Глубина резания при обработке зуба за один проход принимается $2,25m$, где m – модуль зубчатого колеса. Глубина прорезаемой впадины между зубьями будет равна $6,75$ мм.

Необходимую мощность резания ориентировочно определим по карте 96 нормативных материалов [118] в зависимости от глубины резания, ширины фрезерования, диаметра фрезы и числа зубьев дисковой фрезы.

Ориентировочно примем необходимую мощность резания N_T как для дисковой фрезы с позицией №1 карты 96, лист 1 [118]. Оценочная необходимая мощность резания для нарезания зубчатого колеса с параметрами, указанными в таблице N_T составляет $2,35$ кВт.

Сравним необходимую мощность резания с паспортной мощностью станка. Мощность станка при посчитанных режимах обработки составляет около 3 кВт (рисунок 4.2). На основании изложенного выше делаем вывод, что мощность станка достаточна для выполнения предварительного формообразования зубьев дисковой фрезой за один проход.

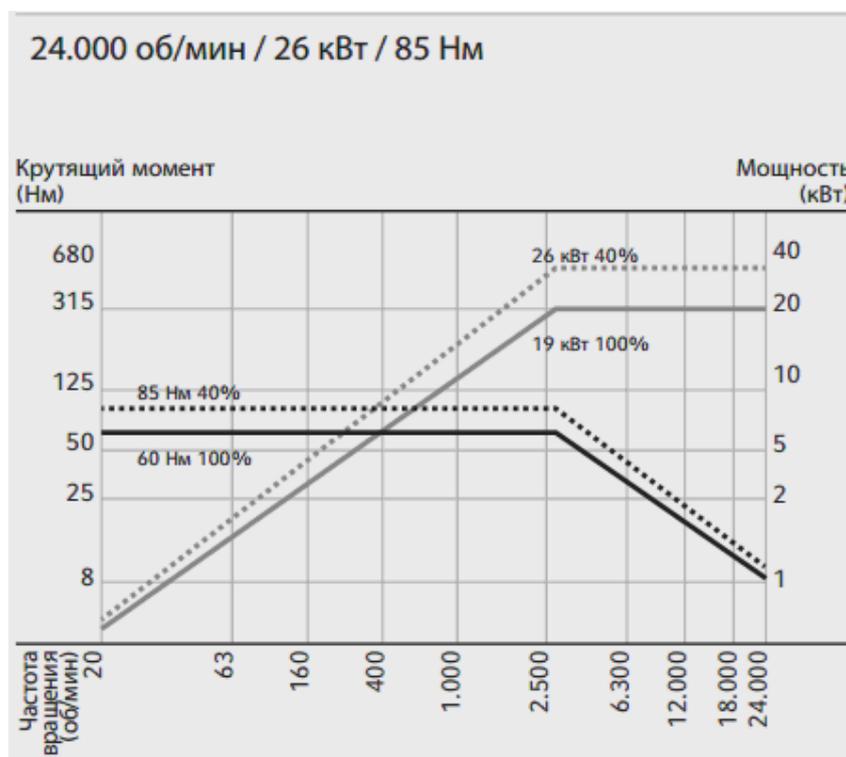


Рисунок 4.2 Диаграмма мощности шпинделя станка

4.2. Оценочный расчет времени предварительного формообразования зубьев дисковой модульной фрезой на станках с ЧПУ.

Для ориентировочной оценки основного времени на черновую обработку зубьев гиперболического зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны воспользуемся разработанной управляющей программой и возможностями программы Siemens NX. При задании режимов резания программа автоматически рассчитывает основное время обработки. Известно, что за счет оптимизации режимов резания можно значительно сократить время обработки, однако эта задача не входила в задачи исследования. Поэтому в разработанной управляющей программе при назначении режимов

резания учитывались рекомендации производителя режущего инструмента и возможности выбранного станка. Ориентировочное расчетное время чернового фрезерования с выбранными параметрами резания в САМ-системе составило около 3-х часов работы выбранного станка (Приложение 1).

Произведем ориентировочную оценку основного времени на выполнение операции чернового фрезерования зубьев гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной кривизны дисковой модульной фрезой, используем зависимость [115]:

$$t_o = \frac{L_p \cdot z}{S_M}, \quad (4.17)$$

где z -число зубьев нарезаемого зубчатого колеса

Длина рабочего хода стола L_p определяется по формуле:

$$L_p = l + l_1 + l_2, \quad (4.18)$$

где l - путь резания, l_1 – величина врезания, l_2 – величина перебега.

Путь резания определяется как длина образующей зуба, которую легко подсчитать, используя встроенные средства измерения длин Siemens NX (рисунок 4.3).

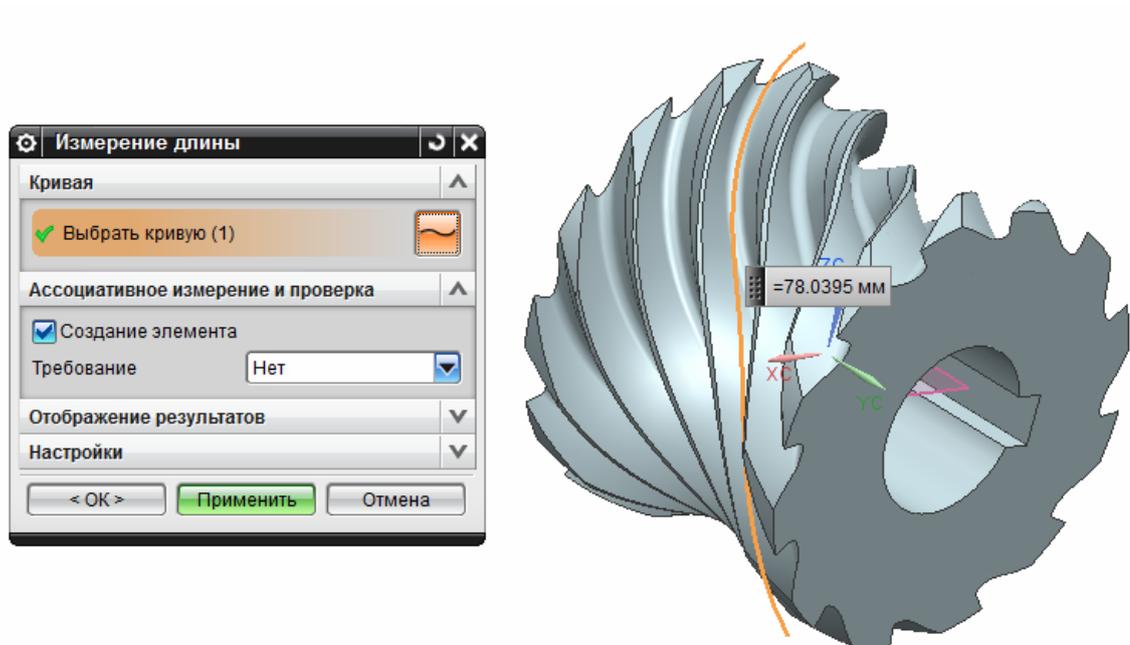


Рисунок 4.3. Определение пути резания инструмента встроенными средствами CAD-системы

Величина врезания определяется по [83]:

$$l_1 = \sqrt{h(D-h)} + 2, \quad (4.19)$$

h -глубина прорезаемой впадины между зубьями; D -диаметр фрезы.

Определим величину врезания: $l_1 = \sqrt{6,75(60-6,75)} + 2 = 21$ мм.

Величина перебега по [52] $l_2 = 2,5$ мм.

Тогда расчетное основное время на обработку зубьев с параметрами зубчатого колеса, указанными в таблице 2.1 будет равно:

$$t_o = \frac{(78\text{мм} + 21\text{мм} + 2,5\text{мм}) \cdot 12}{183\text{мм/мин}} = 6,6 \text{ мин.}$$

Сравним рассчитанное время предварительного формообразования гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной знакопеременной кривизны с временем предварительного формообразования гипоидного зубчатого колеса.

Согласно [87] основное время при раздельном черновом нарезании гипоидных зубчатых колес определяется по формуле:

$$t_o = \frac{t_z \cdot z}{60}, \quad (4.20)$$

где z -нарезаемого колеса, t_z -подача(время обработки одного зуба), с/зуб.

Время обработки одного зуба для зубчатого колеса с окружным модулем 3,0 мм и шириной зубчатого венца 19 мм при передаточном отношении равном единице по таблице 34 равно 17с/зуб. [87]. Так как сравниваемое гиперболоидное зубчатое колесо с зубьями двойной знакопеременной кривизны имеет ширину зубчатого венца 40 мм, то ориентировочно примем равным время обработки гипоидного зубчатого колеса с шириной зубчатого венца 40 мм равным 34с/зуб.

Определим ориентировочное время предварительной обработки гипоидного зубчатого колеса с окружным модулем 3,0 мм и шириной зубчатого венца 40 мм:

$$t_o = \frac{34\text{с/зуб} \cdot 12}{60} = 6,8 \text{ мин.}$$

Таким образом, время предварительной механической обработки гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной знакопеременной кривизны дисковой модульной фрезой на станке с ЧПУ и гипоидного зубчатого колеса летучими резцами имеет приблизительно одинаковую ориентировочную расчетную величину времени обработки. Время черновой обработки за счет использования способа изготовления по патенту 2341357 [129] и разработанной кинематики многокоординатного формообразования (глава 3) по предварительным расчетам можно уменьшить в несколько раз.

Время предварительной обработки впадин гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной знакопеременной кривизны можно дополнительно уменьшить за счет обработки нескольких впадин зуба одновременно, использованием на многокоординатном станке с ЧПУ нескольких дисковых фрез на одной оправке, многовитковых фрез, многорезцовых головок, в чем автор видит развитие данного диссертационного исследования.

4.3. Разработка инструмента для профильной модификации зубьев.

Как известно из элементарной математики, степенью P точки O окружности радиуса r (см. рисунок 4.4) называется величина d^2-r^2 , где d – расстояние от точки до центра окружности. В данном случае $AD=P$. Величину отрезка DE отбрасываем как величину заведомо меньшую, чем предельная погрешность величины AE , так как при расчете, величина DE составляет в процентном соотношении от величины AE менее 1% [101]. Тогда будем иметь: $AD \approx AE$. Из прямоугольного треугольника ACE очевидно, что:

$$AE^2 = (0,2h_l)^2 + \Delta_{\Sigma}^2, \text{ где} \quad (4.21)$$

$0,2h_l$ – высота модификации зубьев дугой окружности, h_l – высота зуба, Δ_{Σ} – величина суммарной погрешности, учитываемой при модификации боковых режущих кромок гребенчатой фрезы.

С другой стороны,

$$P^2 = DC \cdot DB \quad (4.22)$$

Величина DC приближенно равна величине Δ_{Σ} , отличается от нее при осуществлении расчета незначительно, поэтому допускаем, что $DC \approx \Delta_{\Sigma}$.

В свою очередь, величиной DC пренебрегаем, как величиной заведомо малой по сравнению с величиной CB и составляющей в процентном соотношении менее 1% от величины CB [101].

Поэтому, после соответствующих преобразований и допущений:

$$P^2 = \Delta_{\Sigma} \cdot 2R = (0,2h_i)^2 + \Delta_{\Sigma}^2 \quad (4.23)$$

Тогда радиус модификации режущих кромок инструмента примет вид:

$$R = \frac{(0,2h_i)^2 + \Delta_{\Sigma}^2}{2 \cdot \Delta_{\Sigma}} \quad (4.24)$$

Для оценочного определения порядка требуемых модификаций режущих кромок инструмента была использована величина суммарной погрешности, включающая величину шероховатости боковой поверхности зубьев, погрешность отклонения профиля, предельное смещение средней плоскости зуба колеса, накопленную погрешность шага колеса; величину изгиба зубьев колеса под нагрузкой, т.е формула определения суммарной погрешности имеет вид:

$$\Delta_{\Sigma} = \Delta_{ш} + f_f + \Delta_{xp} + \Delta_u, \text{ где} \quad (4.25)$$

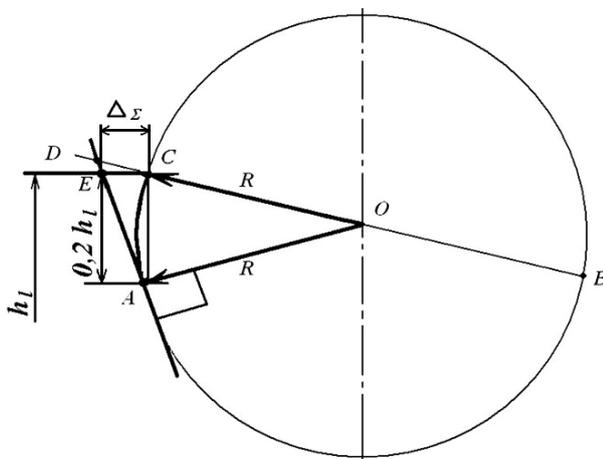


Рисунок 4.4. К расчету модификации режущих кромок инструмента

$\Delta_{ш}$ – параметр, учитывающий шероховатость боковой поверхности зубьев, мм;

f_f – погрешность профиля, мм;

Δ_{xp} – суммарный допуск двух величин f_x и f_p , мм;

$\Delta_{и}$ – оценочный параметр, позволяющий приближенно определить порядок деформаций при изгибе зуба зубчатого колеса под нагрузкой определяемый по формуле (4.26).

При неизвестном законе распределения погрешностей рекомендуется применять распределение треугольника.

Согласно закону треугольника (Симпсона) получим:

$$\Delta_{xp} = \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\frac{f_x}{6} + \frac{f_p}{6} \right), \text{ где} \quad (4.26)$$

f_x – погрешность на предельное смещение средней плоскости зуба колеса, мм;

f_p – погрешность на отклонение шага, мм.

Определение параметра, входящего в формулу для определения модификации режущих кромок инструмента и учитывающего изгиб зуба под нагрузкой, производим в предположении [87], что в зацеплении находится только одна пара зубьев, силы трения отсутствуют, зуб рассматривают как консольно-защемленную балку и нагрузка равномерно распределена по длине зуба и приложена к их вершинам (рисунок 4.5).

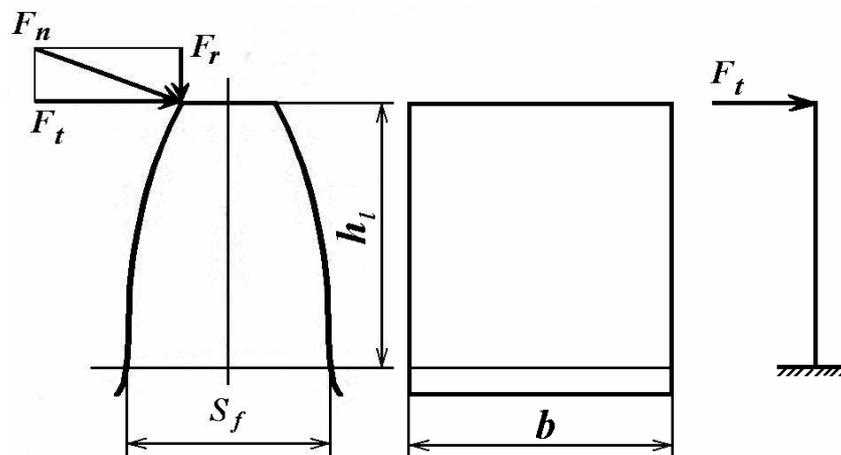


Рисунок 4.5. К расчету зуба на изгиб

Наибольший прогиб для балки определяется согласно источнику [136] и с учетом рисунка 4.5:

$$\Delta_u = \frac{F_t h_l^3}{3EJ}, \text{ где} \quad (4.27)$$

k – коэффициент, учитывающий расположение опор и характер нагрузки, $k=3$ для балки с силой, приложенной на свободном конце;

F_t – окружная сила, приложенная на вершине зуба, Н;

h_l – высота зуба, мм;

E – модуль упругости материала, Мпа;

J – момент инерции сечения, см⁴.

Момент инерции сечения относительно вертикальной оси зуба равен [127]:

$$J = \bar{S}_f^3 \cdot B / 12, \text{ где} \quad (4.28)$$

\bar{S}_f – толщина зуба по хорде окружности впадин, мм,

B – ширина колеса, мм.

При использовании значения модуля упругости материала для зубчатых колес при предположении, что материалы колеса и шестерни одинаковы и изготовлены из стали, подставив значение $E=2 \cdot 10^5$ Мпа в формулу (4.25) и преобразовав ее с учетом формул (4.27), получим следующую формулу для определения наибольшего прогиба:

$$\Delta_u = \frac{F_t \cdot h_l^3}{2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot \bar{S}_f^3 \cdot B \cdot \frac{1}{12}} = \frac{10^{-5} \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot B \cdot \frac{1}{2}} = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot B}. \quad (4.29)$$

Суммарный коэффициент запаса, учитывающий подрезание ножки зуба при фланкировании, реверсивную нагрузку на зуб согласно [6] равен 72.

С учетом коэффициентов получим формулу: (4.30)

$$\Delta_u = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 72 \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot b}.$$

Окончательная формула для модификации режущих кромок инструмента примет вид:

$$R = \frac{(0,2h_i)^2 + \left(\Delta_u + f_f + \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\frac{f_x}{6} + \frac{f_p}{6} \right) + \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 72 \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot b} \right)^2}{2 \cdot \left(\Delta_u + f_f + \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\frac{f_x}{6} + \frac{f_p}{6} \right) + \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot 72 \cdot F_t \cdot h_l^3}{\bar{S}_f^3 \cdot b} \right)}. \quad (4.31)$$

Пример расчета радиуса модификации режущих кромок инструмента приведен в [101].

На инструмент получен патент на изобретение № 2323069.

4.4. Практическая реализация формообразования зубьев на станках с ЧПУ.

Для проверки теоретических результатов, полученных в предыдущих главах осуществим практическое формообразование зубьев на многокоординатном станке с ЧПУ по разработанным управляющим программам.

При практической реализации формообразования поверхности гиперboloида вершин зубьев, режимы резания выбираем согласно рекомендациям производителя режущего инструмента.

По объемной геометрической модели заготовки в среде автоматизированной подготовки управляющих программ (САМ системе) сформируем управляющую программу токарной обработки заготовки однополостного гиперboloида на станке с ЧПУ. Обработка производилась на токарном станке с ЧПУ DMTG SKE6150Z. Обработываемая поверхность, формирующая поверхность вершин зубьев, контролировалась специальным шаблоном.

После формообразования поверхности гиперboloида, ограничивающего поверхность вершин зубьев, фрезерная обработка осуществлялась на станке с ЧПУ Fanuc Robodrill $\alpha 21$ -FI (рисунок 4.6).

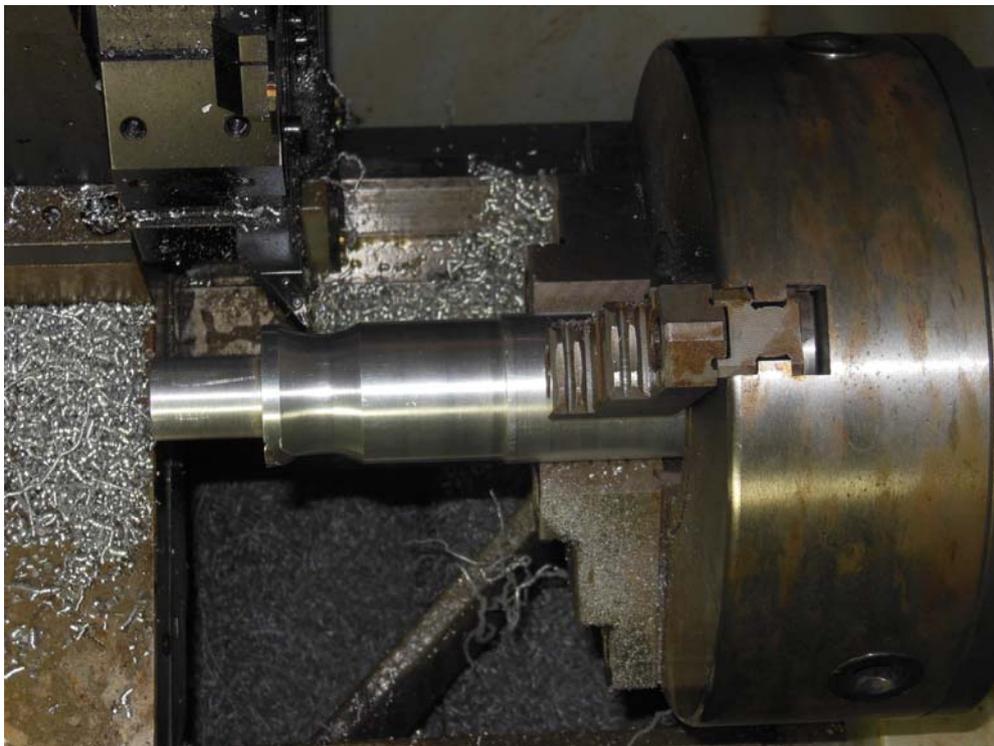


Рисунок 4.6. Обработка заготовки гиперboloидного зубчатого колеса на токарном станке с ЧПУ



Рисунок 4.7 Контроль радиального и торцового биения на станке

Для разработки управляющей программы в системе автоматизированной подготовки управляющих программ (САМ-системе) была использована геометрическая модель зубчатого колеса, полученная в разделе 2.2.

Перед осуществлением зубонарезания, поверхности гиперболоида вращения, сформированные на предыдущей операции, проверялись на радиальное и торцовое биение с помощью индикатора часового типа (рисунок 4.7)

Торцовое и радиальное биение гиперболоида соответствовало допускаемому по чертежу на заготовку зубчатого колеса.

Фрезерование зубьев разбивалось на черновую и чистовую обработку. Используемый для формообразования зубьев металлорежущий инструмент изображен на рисунке 4.8.

Выборка материала на черновой обработке производилась из условия обеспечения максимальной производительности, но с ограничениями на стойкость инструмента с режимами обработки, рекомендуемыми производителем режущего инструмента.



Рисунок 4.8. Используемые для формообразования зубьев концевые фрезы

Для осуществления черновой фрезерования зубьев режимы резания назначались по рекомендациям производителя. Результат обработки после чистового фрезерования показан на рис. 4.9.

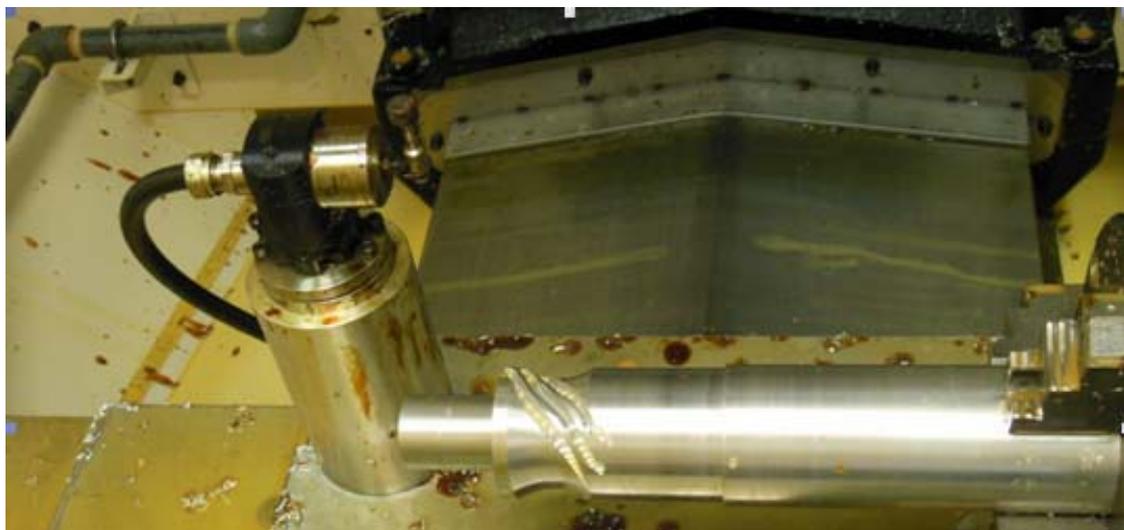


Рисунок 4.9. Результат черновой обработки нескольких зубьев на станке.

Для осуществления чистового фрезерования зубьев режимы резания назначались исходя из рекомендаций производителя режущего инструмента и возможностей станка.



Рисунок 4.10. Чистовое формообразование зубьев фрезерованием на станке с ЧПУ.

Результат обработки зубьев при осуществлении чистового фрезерования показан на рисунке 4.10.

Для практической проверки возможности предварительного формообразования зубьев дисковой модульной фрезой и практической оценки экономии времени обработки при черновом формообразовании зубьев на станках с ЧПУ был осуществлен опыт.

Была изготовлена оправка для дисковой модульной фрезы в станок с ЧПУ. Инструмент для чернового и чистового нарезания по предлагаемой технологии изображен на рисунке 4.11.



Рисунок 4.12. Используемый металлорежущий инструмент - оправка с дисковой модульной фрезой и концевая фреза

В систему подготовки управляющих программ - САМ систему вводились зависимости движения инструмента при осуществлении многокоординатного формообразования зубьев дисковой модульной фрезой.

Оправка устанавливалась в цанговый патрон и производилась черновая обработка зубьев по программе на многокоординатном станке с ЧПУ (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12. Обработка дисковой модульной фрезой гиперболических зубчатых с зубьями двойной кривизны на многокоординатном станке с ЧПУ.

Время предварительной обработки зубьев зубчатого колеса составило 9 минут, что подтверждает теоретические расчеты, произведенные в разделе 4.2.

Изготовленные зубчатые пары изображены на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13. Изготовленные зубчатые колеса

4.4. Опробование и внедрение результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационного исследования внедрены и опробованы на ООО «АДЕМ-Центр» в качестве алгоритмов и математических зависимостей, используемых в CAD/CAM-системе ADEM для получения геометрических моделей и составления управляющих программ обработки зубьев на основе заготовки вида «однополостной гиперболоид вращения».

Проверка теоретических положений диссертационного исследования производилось в CAD/CAM-системе ADEM версии 9.0. Для этого были задействованы математические зависимости расчета положения образующей линии боковой поверхности зубьев, по которым была построена геометрическая модель зубчатого колеса с параметрами: $a_w=50,91$ мм, $m_n = 3$, $z=12$, $\alpha_n = 24^\circ$, $\beta_w = 45^\circ$, $B = 40$ мм, направление винтовой линии – правое.

Для обработки зубчатого колеса использовался станок Micron UCP 800 DURO. Была произведена чистовая обработка зубьев по управляющей программе.

В систему подготовки управляющих программ - САМ систему вводилась разработанная математическая модель движения инструмента при осуществлении многокоординатного чистового формообразования концевыми фрезами в виде траектории движения инструмента.

Далее проводился дополнительный опыт по обработке зубчатого колеса с такими же геометрическими параметрами, но с обработкой без использования разработанной кинематики многокоординатного формообразования зубьев. Время механической обработки при осуществлении чистовой обработки дисковой модульной фрезой по двум опытам сравнивалось. Время обработки фиксировалось хронометрическим способом.

В результате сравнения было получено снижение времени чистовой обработки при использовании разработанной кинематики формообразования гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны на 12%.

Результаты работы переданы для практического внедрения и опробованы на АО «Вакууммаш». На АО «Вакууммаш» по результатам работы опробовано предварительное формообразование гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной переменной кривизны. Было достигнуто снижение времени обработки боковой поверхности таких зубьев с 7 часов до 15 минут.

Результаты исследования переданы для практического внедрения и опробованы на ПАО «Камаз» в части создания и опробования опытных высоконагруженных зубчатых пар главной передачи грузового автомобиля «Камаз» по гранту между КНИТУ им. А.Н. Туполева (КАИ) и ПАО «Камаз» «Перспективные экологичные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат». Изготовлены опытные образцы зубчатых колес.

По результатам экспериментальных исследований было установлено, что при обработке концевой фрезой гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны на пятикоординатных станках с ЧПУ следует использовать предложенную методику управления ориентацией фрезы, так как она позволяет снизить время обработки боковых поверхностей гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной кривизны, а также использовать для формообразования зубьев на пятикоординатных станках с ЧПУ специальные и фасонные инструменты. Для повышения стойкости инструмента и производительности зубофрезерования с использованием предлагаемой методики управления ориентации инструмента следует (предварительно обработав область горлового сечения) применять стратегию обработки боковой поверхности зубьев от горлового сечения зубчатого колеса к торцовым сечениям, что увеличивает производительность фрезерования.

3. Способ предварительного формообразования зубьев в совокупности с разработанной кинематикой многокоординатного формообразования зубьев позволяет значительно сократить время обработки таких зубчатых колес.

Выводы по главе:

1. Разработан способ предварительного формообразования зубьев дисковой или модульной пальцевой фрезой, позволяющий увеличить производительность обработки по сравнению с обработкой концевой сфероконической фрезой. Для выбора номера инструмента из набора фрез предложена математическая зависимость.
2. Разработан инструмент для осуществления профильной модификации зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны, позволяющий учитывать в геометрии режущих кромок инструмента следующие погрешности изготовления и деформации зубьев под нагрузкой: погрешность профиля зубьев, погрешность шага зубьев, смещение средней плоскости зубьев зубчатого колеса, шероховатость боковой поверхности зубьев, смещение зубьев под нагрузкой.
3. Доказана технологическая возможность практической реализации формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны на пятикоординатных станках с ЧПУ.
4. Получены управляющие программы токарной обработки гиперболоида вершин зубьев и фрезерной пятикоординатной обработки зубьев с использованием предложенной кинематики формообразования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Получены математические зависимости для расчета координат точек направляющей линии, позволяющие создавать геометрические модели боковой поверхности зубьев двойной переменной кривизны, форма которых получается движением производящей линии вдоль направляющей линии. Разработаны математические зависимости для расчета координат точек производящих линий, выполненных дугами окружности и эллипса и используемых при осуществлении профильной модификации зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной кривизны с целью получения высотной локализации пятна контакта зубьев.
2. Получена геометрическая модель гиперболоидного зубчатого колеса с зубьями двойной переменной кривизны, используемая для пятикоординатного формообразования фрезерованием.
3. Разработана математическая модель кинематики пятикоординатного формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны, включающая в себя определение поверхности, полученной движением следа режущей кромки инструмента при чистовой обработке, определение поверхностей, ограничивающих линии головок и ножек зубьев, расчет угла ориентации оси инструмента. Полученная методика позволяет осуществлять обработку зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны с использованием непосредственного ввода данных в станок с ЧПУ без использования систем подготовки управляющих программ. Изложен алгоритм расчета и ввода полученных значений вектора ориентации и координат точек трассировки инструмента в программное обеспечение для подготовки управляющих программ при реализации разработанной кинематики формообразования зубьев.

4. Разработан способ предварительного формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны модульными дисковыми и пальцевыми фрезами, позволяющий увеличить производительность обработки по сравнению с обработкой концевой сфероконической фрезой. Для выбора номера инструмента из набора фрез предложена математическая зависимость. Разработан инструмент для осуществления профильной модификации зубьев гиперболоидного зубчатого колеса двойной кривизны, позволяющий учитывать в геометрии режущих кромок инструмента следующие погрешности изготовления и деформации зубьев под нагрузкой: погрешность профиля зубьев, погрешность шага зубьев, смещение средней плоскости зубьев зубчатого колеса, шероховатость боковой поверхности зубьев, смещение зубьев под нагрузкой.
5. Доказана технологическая возможность практической реализации формообразования фрезерованием зубьев гиперболоидных зубчатых колес двойной переменной кривизны на пятикоординатных станках с ЧПУ. Разработаны управляющие программы токарной обработки гиперболоида вершин зубьев и фрезерной пятикоординатной обработки зубьев с использованием предложенной кинематики формообразования для зубчатых колес.
6. Разработанный способ предварительного формообразования зубьев в совокупности с разработанной кинематикой многокоординатного формообразования зубьев позволяет существенно сократить время обработки зубчатых колес.

Список литературы

1. Абросимова А.Р. Кузьминский Д.Л., Максимов Ю.В., Мокринская А.Ю. К вопросу повышения качества обработки сложнопрофильных деталей на фрезерных станках. Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле – и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://mami.ru/science/aai77/scientific/article/s07/s07_01.pdf. – (Дата обращения: 08.01.2015).
2. Аверченков В.И., Жолобов А.А., Мрочек Ж.А., Аверченков А.В., Терехов М.В., Левкина Л.Б. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. – Учебное пособие для вузов. Часть 2. – Брянск, 2012. - 212 с.
3. Андожский В.Д. Модификация головок зубьев рейкой с линией модификации по дуге окружности // Вестник машиностроения. -1978. - №8. – С.26-29.
4. Андожский В.Д. Модификация головок внешних зубьев эвольвентных зубчатых колес. Вестник машиностроения. -1985. №7. – С.15-17.
5. Анисимов Р.В., Афанасьев Б.И., Чепикова И.М., Степанов Ю.С., Киричек А.В., Тарапанов А.С. Зубоиглошевер: пат. 2440217 С1 РФ №2010118254/02; МПК В23F21/28. заяв. 05.05.2010; опубл.20.01.2012.
6. Антонюк В.Е., Иванов Б.В., Кане М.М., Схиртладзе А.Г., Кудинов А.Т., Руденко С.П., Старжинский В.Е. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач. – СПб: Профессия, 2007 -832с.
7. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. М.: Машиностроение, 2001.
8. Анферов В.Н. Создание приводов подъемно-транспортных машин на основе спироидных передач: дис. д-ра тех.наук: 05.04.04 / Анферов Валерий Николаевич. – Новосибирск. – 2002. – 278с.

9. Бабичев А.П., Гетманский Д.В., Дагин М.Б. Опыт обработки некруглых отверстий длинномерных деталей абразивными инструментами (на примере ленточного шлифования и хонингования // В сборнике: Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы. Шлифабразив-2009. Сборник статей Международной научно-технической конференции. Волжский институт строительства и технологий (филиал) Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – С. 139-143.
10. Барановский Ю.В. Режимы резания металлов/справочник под. ред. Барановского Ю.В. Москва, Машиностроение, 1972. – 497с.
11. Батуев В.В. Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: дис. канд.тех.наук: 05.02.08. / Батуев Виктор Викторович. - Челябинск, 2007. – 182с.
12. Беклемишев Д.В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: Учеб. для вузов. - М.: Физматлит, 2005. - 304 с.
13. Белякова В.А. Комбинированная чистовая обработка цилиндрических зубчатых колес: дис. канд.техн.наук: 05.03.01 / Белякова Валентина Александровна. – Тула, 2006. – 213 с.
14. Белянский А.Д., Мельников А.В., Каретный З.П., Стрельников Н.Н., Попов В.А. Косозубая зубчатая передача. Патент RU 2116532 С1, МПК F16H55/08, дата опубликования: 27.09.1998.
15. Боголюбов А.Н. Теория механизмов и машин в историческом развитии ее идей. М.:Наука, 1976. – 466с.
16. Болтянский А.И. Условия эффективного внедрения станков с ЧПУ / А.И. Болтянский // Механизация и автоматизация производства. – 1978. – № 5. – С. 47.
17. Борисов В.Д. Устройство для обработки зубьев гиперболоидных зубчатых колес. МПК В23F, Опубликовано 30.07.1966, Бюллетень № 16.

18. Братухин А.Г., Халимуллин Р.М., Юнусов Ф.С., Красильников Ю.Г., Павлов А.Ф. Размерное и безразмерное формообразование поверхностей деталей. М.: Машиностроение, 1996. - 272 с.
19. Бруевич Н.Г. О точности механизмов, М.: 1941.
20. Валиков Е.Н., Тимофеев Ю.С., Журина А.С. Инструмент для финишной отделки зубчатых колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. - №8. –С. 254-259.
21. 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. - №12-1. –С. 17-20.
22. Верещагин М.О. Подход к проектированию спироидной цилиндрической передачи при малом передаточном отношении// Интеллектуальные системы в производстве. – 2014. - № 1 (23). – С.28-31.
23. Верховский А.В. Геометрическое моделирование при анализе и синтезе червячных передач общего типа: дис. д-ра тех.наук: 05.02.18 / Верховский Александр Владимирович. – Москва, 2000. - 254с. Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/geometricheskoe-modelirovanie-pri-analize-i-sinteze-chervyachnykh-peredach-obshchego-tipa>, дата обращения: 10.01.2015.
24. Вильдгабер Э. Основы зацепления конических и гипоидных передач. М.: Машгиз, 1948.
25. Витренко В.А. Изготовление и отделка цилиндрических зубчатых колес гиперблоидными инструментами. Монография. – Луганск: изд-во ВЛУ, 1994. 112 с.
26. Витренко А.В. Основы технологии изготовления винтовых зубчатых колес // Прогресивні технології і системи машинобудування. – 2015. – №1 (51). – С. 42-47.
27. Витренко В.А., Белозерова В.В. Повышение производительности зубонарезания цилиндрических зубчатых колес гиперблоидным

инструментом за счет совершенствования формообразования резанием: монография — Луганск: Ноулидж, 2009.

28. Витренко В.А., Бочарова И.А., Б.С. Воронцов, С.Г. Кириченко. Вопросы совершенствования технологии формообразования зубьев на гиперболоидных заготовках. // Вестник национального технического университета «ХПИ» - Харьков. - 2013. - № 41 (1014). – С. 27-31.
29. Витренко В.А., Воронцов Б.С. Совершенствование кинематических схем формообразования зубообрабатывающего инструмента // Вестник СевГТУ. - Севастополь: Изд-во СевНТУ. 2012. - Вып.129: Машиноприборостроение и транспорт.- С.40-44.
30. Витренко В.А., Воронцов Б.С., Кириченко С.Г. Поверхностное моделирование гиперболоидных инструментов в системе PowerSHAPE // Сборник научных трудов "Вестник НТУ "ХПИ": Проблемы механічного приводу. 2011. - №29. – С. 30-35.
31. Витренко В.А., Воронцов Б.С., Кузнецова М.Н., Черноволов В.В. Формообразование зубьев многозаходных зубообрабатывающих инструментов [Электронный ресурс] // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2011. - № 713. - С. 3-6. Режим доступа: http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/12176/1/002_Formoobrazovanie%20zubev_3_6_713.pdf. - (Дата обращения: 11.01.2015).
32. Волков А.Э. Повышение эффективности моделирования процессов формообразования и анализ работы конических и гипоидных передач на стадии подготовки производства: дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Волков Андрей Эрикович. - М.: 2001. – 460с.
33. Волков А.Э., Медведев В.И. Компьютерная подготовка производства конических авиационных передач // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 14. - 2012. - №4(2). - С. 728-732.
34. Волков А.Э., Шевелева Г.И. Компьютерный анализ работы конических и гипоидных зубчатых передач // Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2001. - № 5. - С.96-103.

35. Волков И.В., Дзей С.Е., Малеванец Д.В. Исследования производительности шпиндельной обработки в среде свободного абразива // ВІСНИК СЕВНТУ. Изд-во: Севастопольский национальный технический университет (Севастополь). – 2012. - №129. – С.35-39.
36. Воронцов Б.С. Гиперболоидные инструменты для изготовления цилиндрических колес с произвольным профилем зуба // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць. — Краматорськ, 2006. — Вип. 19. — С. 76–81.
37. Воронцов Б.С. Моделирование гиперболоидных инструментов с использованием САД – систем / Б.С. Воронцов, В.А. Витренко, И.А. Бочарова, И.А. Кириченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем// Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2005. – Вип.№17. – С.318-323.
38. Воронцов Б.С. Особенности твердотельного компьютерного моделирования гиперболоидных передач // Сборник научных трудов "Вестник НТУ «ХПИ»: Проблемы механического привода. -2007. №23.
39. Выбойщик А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. / Выбойщик Александр Владимирович. - Челябинск, 2000. – 182с.
40. Вэй Пью Маунг. Повышение эффективности контурной обработки на станках с ЧПУ путем коррекции траектории и режимов резания: дис. канд.тех.наук: 05.02.08 / Вэй Пью Маунг. - Москва, 2014. – 165с.
41. Гавриленко В.А. Основы теории эвольвентной зубчатой передачи. М.: Машиностроение, 1969, 432 с.
42. Гаврилов Н.С. Средства псевдокодированного моделирования в автоматизированном проектировании программ числового управления в машиностроительном производстве (токарная и фрезерная обработка): дис. канд. тех. наук: 05.13.12 / Гаврилов Николай Сергеевич – Ульяновск, 2014.

43. Генкин М.Д., Рыжов М.А., Рыжов Н.М. Повышение надежности тяжело нагруженных зубчатых передач. М.: Машиностроение, 1981, 232 с.
44. Гольдфарб В.И., Кунивер А.С. Особенности конструкции и профилирования фрезы для модификации зубьев спироидных колес. "Машиностроитель", М., 2003, №3, с. 29-31.
45. Гольдфарб В.И., Несмелов И.П. Недифференциальный подход к решению задачи огибания. В сб.: Механика машин, вып. 61. - М.: Наука, 1983, с. 3-10.
46. Гольдфарб В.И., Трубачев Е.С. Что не делать и что не делать при выборе и проектировании редукторов ТПА // Арматуростроение. – 2010. - №1 (64). – С. 52-57.
47. ГОСТ 16530-83. Передачи зубчатые. Термины, определения и обозначения.
48. Грановский Г.И. Кинематика резания. М.: Машгиз, 1948.
49. Грибанов В.М. Теория гиперболоидных зубчатых передач. Монография. Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2003, 272 с.
50. Гуляев К.И., Рязанцева И.Л. Профильная модификация зубьев колес эвольвентной цилиндрической передачи с учетом деформации зацепления // Журнал "Приборостроение". – 1981. - № 5.
51. Давыдов Я.С. Неэвольвентное зацепление. М.: Машгиз, 1950.
52. Данилевский В.В. Справочник молодого технолога-машиностроителя, 3-е изд. – М.: Высшая школа, 1973. – 648с.: ил.
53. Данилов В.А. Формообразующая обработка сложных поверхностей резанием. Минск: Наука и техника, 1995.
54. Демидов В.В., Гуськова Е.В. Влияние профиля зубьев червячно-модульных фрез на точность зубьев прямозубых колес // Вестник машиностроения. – 2012. №6. - С. 64-67.
55. Демидов В.В., Гуськова Е.В., Полянсков Ю.В. Повышение точности профиля зубьев колес, обработанных червячно-модульными фрезами с

- положительными передними углами // Технология машиностроения. - 2011. - №12. - С. 5-9.
56. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики: Учебник для машиностроит. спец. Вузов. М.: Высш. Школа, 1983.
57. Дорофеев В.Л., Голованов В.В., Гукасян С.Г. Модификация авиационных зубчатых передач с целью уменьшения износа контактной поверхности // Современное машиностроение. Наука и образование - 2014. - № 4. - С. 173-183.
58. Дорофеев Д. В. Метод определения формы модификации зубчатых колес для повышения их нагрузочной способности // Актуальные вопросы технических наук: материалы междунар. науч. конф. г. Пермь, июль 2011 г. — Пермь: Меркурий, 2011. — С. 66-68.
59. Дорофеев Д.В., Шевченко И.В. Модификация зубчатых колес с коэффициентом перекрытия более двух // Наука и образование: Электронное научно-техническое издание, МГТУ им. Н.Э. Баумана, №5, 2011.
60. Дружинский И.А. Сложные поверхности: Математическое описание и технологическое обеспечение: Справочник. - Л. Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1985. - 263 с.
61. Елисеев Ю.С., Бойцов А.Г., Крымов В.В., Хворостухин Л.А. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. М.: «Машиностроение», 2003.
62. Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Нежурин И. П., Новиков В.С., Рыжов Н.М. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей: Произв.-практ.издание/Под ред. Ю.С. Елисеева. – М.: Высш. шк., 2001. – 493 с.; ил.

63. Елкин М.С. Исследование влияния износостойких покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами лопаток и моноколес ГТД: дис.канд.тех.наук: 05.02.08 / Елкин Михаил Сергеевич – Рыбинск, 2015.
64. Емелин А.Г. Геометрическое моделирование технологического процесса фрезерной обработки на станках с ЧПУ: дис. канд. тех. наук: 05.13.12. / Емелин Алексей Геннадьевич. - Екатеринбург. - 2004, 132 с.
65. Жамангараев С.Ж. Кинематика и динамика формообразования сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд. тех. наук: 05.02.18. / Жамангараев Самарбек Жолдошбекович. - Санкт-Петербург. - 1993.
66. Жиганов В.И., Сахно Ю.А., Демидов В.В., Сахно Е.Ю. Механическая обработка зубчатых колес: учебное пособие – Ульяновск: УлГТУ, 2011 – 134 с.
67. Жучков И.В. Выбор технологических параметров процесса обработки спирально-конических колес с использованием модификации обкаточного движения: дисс. канд.тех.наук: 05.02.07. / Жучков Иван Валерьевич. – Москва. - 2011. – 213с.
68. Зверинцева Л.В. Инструмент для абразивного полирования внутренней поверхности волноводов космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. Изд-во: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. Академика М.Ф. Решетнева. – 2008. - № 1(18). – С. 35-39.
69. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Аналитическая геометрия: Учеб. для вузов. М.:Наука, 2004 - 224 с.
70. Калашников А.С. Зубопритирка и зубошлифование колес конических и гипоидных передач // Справочник. Инженерный журнал. – 2011. -№ 3. – С.3-7.
71. Калашников А.С. Зубохонингование цилиндрических колес // РИТМ: Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация. – 2013. - № 10 (88). –С. 22-29.

72. Калашников А.С. Методы чистовой обработки зубьев колес конических и гипоидных передач // Справочник. Инженерный журнал. – 2011. - № 1. – С. 22-25.
73. Калашников А.С. Современные методы чистовой обработки зубьев цилиндрических колес. Металлообработка // Оборудование и инструмент для профессионалов. – 2009. – №6. – С. 38-42.
74. Калашников А.С. Технология изготовления зубчатых колес. М.: Машиностроение, 2004, 480с.
75. Калинин А.А. Разработка моделей пространственно-сложных поверхностей для программирования обработки на станках с ЧПУ: дис. канд. тех. наук: 05.13.06. / Калинин Анатолий Анатольевич. – Москва. – 2007. – 129с.
76. Карачаровский В.Ю. Геометрическое моделирование формообразования пространственных поверхностей при винтовом относительном движении / В.Ю. Карачаровский, С.А. Рязанов // Проблемы геометрического моделирования в автоматизированном проектировании и производстве: Материалы I Междунар. науч. конф.- М.: Изд-во МГИУ, 2008. - С. 143-146.
77. Карачаровский В.Ю. Визуализационная оценка параметров локализованного контакта в червячных передачах на основе методов 3D компьютерной графики / В.Ю. Карачаровский, С.А.Рязанов // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2011. - №2 (56). Вып. 2. - С. 73-77.
78. Карачаровский В.Ю., Рязанов С.А. Применение методов компьютерной 3D графики и твердотельного моделирования при разработке технологических процессов зубонарезания // Вестник Саратовского государственного технического университета. - 2010. - №4 (49). Вып. 1. - С. 55-60.

79. Каяшев А.И., Митрофанов В.Г., Схиртладе А.Г. Методы адаптации при управлении автоматизированными станочными системами. М.: Машиностроение, 1995.
80. Кириченко И.А. Создание гиперболоидных передач с линейным контактом зубцов на базе специальных режущих инструментов: автореф. дисс. д.т.н.: 05.02.02, Луганск, 2004.
81. Кириченко С.Г. Технология изготовления гиперболоидных фрез // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2014. - № 31 (1074). – С.61-64.
82. Кириченко С.Г. Изготовление гиперболоидных зубчатых колес и фрез на однополостных гиперболоидах // Вестник национального технического университета «ХПИ». 2014. - № 29 (1072). – С. 64-68.
83. Клепиков В.В., Бодров А.Н. Технология машиностроения: Учебник. - М.: Форум: Инфра-М. 2004. - 860 с.
84. Коган Г.И. Изготовление цилиндрических колес со шлифованными зубьями. М.: Машгиз, 1962. 240 с.
85. Коростелев Л.В., Ясько В.В. Изготовление зубчатых передач, не чувствительных к погрешностям монтажа. Машиноведение, № 5, 1968, с. 50-53.
86. Корышев А.Н., Стрельников Н.Н., Попов В.А. Модифицированная эвольвентная передача. Патент RU 2128303 С1.
87. Косилова А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Том 1. М., Машиностроение, 1986.
88. Кравченко Д.В., Рязанов С.И., Брехов Е.В. Патент 2212317 Российская Федерация, МПК7 В 23 Н1/00, В 23 Н7/02. Способ электроэрозионной обработки зубчатых колес. № 2002121078/02; заявл. 08.02.02; опубл. 20.09.03, Бюл. № 35. – 10 с.
89. Кресик Д.А. Автоматизация технологической подготовки производства корпусных деталей при обработке на многофункциональном

- оборудовании с ЧПУ: дис. канд.тех.наук: 05.13.06. / Кресик Дмитрий Анатольевич. – Москва. – 2008. - 140с.
90. Крупина Н.П., Гаврилов Ю.В. Расчет параметров профильной модификации зуборезных инструментов // Известия Челябинского научного центра УрО РАН. 2007. - № 1. - С. 156-162.
91. Кузовкин А.В., Суворов А.П. Разработка технологии изготовления фасонного инструмента на основе быстрого прототипирования // Вестник Воронежского государственного университета. – 2014. – том 10. - №1. – С. 35-37.
92. Куклин Н.Г., Куклина Г.С. Детали машин: Учеб. для машиностроит. спец. техникумов. – М.: Высш. Шк., 1987.
93. Лагутин С.А. Синтез цилиндрических зубчатых передач с двойкой модификацией поверхностей зубьев. Материалы конференции Редукторостроение России: состояние, проблемы, перспективы. Санкт-Петербург, изд-во ЦЦП Светоч, 2002 г.
94. Лашнев С.И., Борисов Л.Н. Геометрическая модель формирования поверхностей режущими инструментами / СТИН, 1995, N / стр. 22-26.
95. Лещенко А.И. Формирование качественных показателей сложно-профильных поверхностей при обработке на станках с ЧПУ. [Электронный ресурс]. // Прогресивні технології і системи машинобудування. 2012. № 1 (44). С.135-141. Режим доступа: <http://uran.donetsk.ua/~masters/2013/fimm/korol/library/article4.pdf> . – (Дата обращения: 11.01.2015).
96. Лещенко А.И. Особенности трансформации режимных параметров обработки сложно-профильных поверхностей, связанных с ее топологией. [Электронный ресурс] // Сборники научных работ НТУ «ХПИ»: Різання та інструмент в технологічних системах №81 - НТУ "ХПИ", 2012, URL: <http://archive.kpi.kharkov.ua/View/30419> - (Дата обращения: 11.01.2015).

97. Либуркин Л.Я. Профильная модификация зубьев цилиндрических колес, нарезанных зуботочением // М., журнал Машиноведение. -1985. - № 5.
98. Литвин Ф.Л. Теория зубчатых зацеплений. М.: Наука, 1968.
99. Литвин Ф.Л. Справочник конструктора точного приборостроения. Под ред. Ф.Л. Литвина. М.-Л., Изд. «Машиностроение», 1964. 944 с.
100. Ловыгин А.А., Теверовский Л.В. Современный станок с ЧПУ и САД/САМ система. М.: ДМК Пресс, 2012. – 279 с.
101. Ляшков А.А. Методология геометрического и компьютерного моделирования формообразования технических поверхностей: дис. д-ра тех.наук: 05.01.01 / Ляшков Алексей Ануфриевич – Нижний Новгород, 2014.
102. Макаров В.М. Обеспечение точности профильного шлифования винтовых зубьев крупномодульных цилиндрических колес на основе имитационного моделирования: автореф. канд.тех.наук: 05.02.07., 05.02.08. / Макаров Владимир Михайлович. – Саратов. – 2010. - 36 с.
103. Маликов А.А. Основы высокоэффективной технологии изготовления цилиндрических зубчатых колес: дис. д-ра тех.наук: 05.02.08 / Маликов Андрей Андреевич. – Тула, 2009. - 443 с.
104. Маликов А.А. Опытная установка для финишной электрохимической обработки закаленных цилиндрических зубчатых колес // СТИН. – 2003. - №10.- С. 35-37.
105. Маликов А.А., Сидоркин А.В., Ямников А.С. Повышение качества обработки цилиндрических колес шевингованием-прикатыванием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. - №8. –С. 63-68.
106. Маликов А.А., Ямников А.С. Прогрессивные способы чистовой обработки эвольвентной поверхности цилиндрических колес // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. - №8. –С. 37-47.

107. Маринушкин Д.А. Повышение долговечности гипоидных передач применением твердых добавок к смазочному материалу: дис. канд.тех.наук: 05.02.02 / Маринушкин Дмитрий Александрович. – Красноярск, 2008. - 123с.
108. Мархель И.И. Детали машин: Учебник. – М.: Форум: Инфра-М., 2005.
109. Матвеев Г.А. Некоторые вопросы геометрии и изготовления гиперболоидных колес: автореф. дисс. канд.тех. наук. – Казань. – 1961. – 14с.
110. Матвеев Г.А. Один из способов образования поверхностей зубьев гиперболоидных колес. Труды Казанского авиационного института. Вып. 60. - Казань – 1960. - с. 24.
111. Матвеев Г.А., Печенкин В.М. Зубчатая передача и исходный производящий контур для ее изготовления. Патент RU 2093740 С1, Дата публикации: 20.10.1997, МПК F16H55/08, 1/06.
112. Матвеев Г.А., Печенкин В.М. Уравнения боковых поверхностей гиперболоидных зубчатых колёс. - в кн.: Повышение надёжности и долговечности деталей и узлов двигателей летательных аппаратов. Труды Казанского авиационного института. Вып. 183 – Казань. – 1975. - с. 24-33.
113. Мацегора Е.А., Крылов Н.Н., Попов В.А. Червячная передача. а.с. 806934, М.кл. F16H1/16, Опубл. 23.02.1981, Бюл. №7.
114. Мерцалов Н.И. Теория пространственных механизмов. - М.: Машгиз, 1951. - 206с.
115. Морозов И.М., Гузеев В.И., Фадюшин С.А. Техническое нормирование операций механической обработки деталей: Учебное пособие. Компьютерная версия. – 2-е изд., перер.- Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 65с.
116. Никитенко А.В., Давыдов В.М. Выбор режимов резания для обработки формообразующей модельной оснастки мелкогабаритным инструментом. Вестник УГАТУ, 2012, Т.16, №4 (49).

117. Новиков М.Л. Зубчатые передачи с новым зацеплением. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1958. - 187 с.
118. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением. Часть II: Нормативы режимов резания. М.: «Экономика», 1990.
119. Одинарцев И.А., Филиппов Г.В., Шевченко А.Н. Справочник инструментальщика: под. общ. Ред. И.А. Одинарцева. – Л.: Машиностроение, 1987.
120. Одинец М.Н. Разработка принципов и алгоритмов модификации моделей деталей в процессе технологического проектирования токарной обработки на станках с ЧПУ: дис. канд. техн. наук: 05.13.12. / Одинец Мария Николаевна - Омск, 2004. – 220с.
121. ОСТ 2И41-174-87. Фрезы дисковые зуборезные модульные.
122. Печенкин В.М. Способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес и устройство для его осуществления. а.с. 965645, В23F1/06, Опубл. 15.10.1982.
123. Печенкин В.М. Исследование гиперболоидной зубчатой передачи с двумя зонами контакта: дис. канд.тех.наук: 05.02.18. / Печенкин Владимир Михайлович. – Казань. - 1983.
124. Печенкин В.М. Способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес, а.с.№ 1514515, МПК В23F1/06, Опубл. 15.10.1989, Бюл. № 38.
125. Печенкин М.В. Гиперболоидная зубчатая передача. Патент на полезную модель № 87112, зарегистрирован в Государственном реестре полезных моделей 27.09.2009.
126. Печенкин М.В. Гребенчатая фреза. Патент на изобретение РФ № 2323069 от 27.04.2008г.
127. Печенкин М.В. Модификация профиля – один из способов повышения технологичности зубчатых колес // Рабочие процессы и технология двигателей. Сборник трудов международной научно-

технической конференции, посвященной 1000-летию города Казани, 23-27 мая 2005 г.

128. Печенкин М.В. Профильная модификация зубьев гиперболоидной передачи // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н.Туполева. – 2002. - №2. – С. 29-32.
129. Печенкин М.В. Способ изготовления гиперболоидных зубчатых колес. Патент на изобретение РФ №2341357 от 20.12.2008г.
130. Печенкин М.В. Исследование формообразования зубьев гиперболоидных колес в среде Siemens Advanced Simulation// Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2014. – Казань. – 2014. Том I. - С. 415-416.
131. Печенкин М.В. Методика исследования взаимного положения боковых поверхностей зубьев гиперболоидной передачи на ЭВМ в процессе зацепления // Сборник докладов Международной научно-практической конференции АКТО-2014. – Казань. – 2014. Том I. - С. 417-419.
132. Печенкин М.В. Анализ неточностей изготовления гиперболоидных зубчатых колес // Гагаринские чтения. Сборник трудов XXXIII международной молодежной научной конференции, 3-6 апреля 2007 г. В VIII томах. Том V – Москва: «МАТИ» - Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского. 2007. – С. 14-16.
133. Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Расчет положения производящих линий при формообразовании боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи// Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6 [Электронный журнал]; URL: <http://www.science-education.ru/120-16410> (дата обращения: 22.12.2014).
134. Печенкин М.В., Абзалов А.Р. Кинематика формообразования боковой поверхности зубьев гиперболоидной передачи концевым

- инструментом // Фундаментальные исследования. – 2014. - № 12-11. – С. 2310-2314.
135. Письманик К.М., Карачаровский В.Ю. Способ изготовления червячной передачи с локализованным пятном контакта. а.с. 633677, опубликовано 25.11.1978. Бюл. №43.
136. Подашев Д.Б. Оптимизация финишной обработки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов эластичным абразивным инструментом: дис. канд. тех.наук: 05.02.08. / Подашев Дмитрий Борисович. – Иркутск, 2014. – 169с.
137. Поклад В.А., Яковлев В.А., Дорофеев В.Л. Обеспечение работоспособности центрального привода двигателей в условиях повышенных вибраций //Авиационно-космическая техника и технология . - 2008. - № 9. - С. 72–75.
138. Попов В.А. Критерий, определяющий повышенные эксплуатационные свойства передач зацеплением // Вестник машиностроения. - 2010. - № 9. - С. 37-39.
139. Попов В.А., Долбенко Е.Т., Ламухин А.М., Скорохватов Н.Б., Синев О.В., Пименов В.Н. Косозубая зубчатая передача. Патент RU 2222738 С1, МПК F16H55/08, 1/08, Дата опубликования: 27.01.2004.
140. Привалов И.И. Аналитическая геометрия. М.:Наука, 1966 - 272 с.
141. Проволоцкий А.Е., Мохеб Мохаммад. Обработка свободным зерном со шлифованием // Прогрессивні технології і системи машинобудування. – 2010. – №1. – С. 161-166.
142. Проволоцкий А.Е., Негруб С.Л. Использование полимераабразивного эластичного инструмента на операциях чистовой обработки // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2006. - № 33. – С. 106-108.
143. Радзевич С.П. Формообразование сложных поверхностей на станках с ЧПУ. – Киев: "Вища школа", 1991. - 192с.

144. Родин П.Р. Основы формообразования поверхностей. Киев: «Вища школа», 1979.
145. Севрюк В.Н., Витренко А.Н. а.с. № 536902, В 23 F 9/04, 1973. Способ нарезания зубчатых колес. МПК В23F9/04, Опубликовано 30.11.1976, Бюл. № 44.
146. Сегаль М.Г. Влияние погрешностей на условия контакта пространственной зубчатой передачи // Машиноведение. 1975. - №5. - С.49 - 54.
147. Сибикин М.Ю. Metalлообрабатывающее оборудование машиностроительных предприятий. Учебное пособие. – М.: Директ-Медиа, 2014. – 564 с.
148. Скрыбин В.Н., Феофилова И.И., Рахметов С.Л. Инструментальные наладки при изготовлении червячных колес [Электронный ресурс] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 4-1. С. 58-68. Режим доступа: conf.tsu.tula.ru/files/sect_68_doc_233.doc. – (дата обращения: 09.01.2015).
149. Спирин В.А., Силукова Ю.А., Селянинов Ю.А., Титова Л.С. Теплодинамическая оценка параметров глобоидного зубохонингования сложнопрофильных деталей // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. Т. 13. - №1. – С. 94-105.
150. Старжинский В.Е., Шалобаев Е.В., Шилько С.В., Антонюк В.Е., Басинюк В.Л., Благодарный В.М., Гольдфарб В.И., Капелевич А.Л., Мардосевич, Тимофеев Б.П., Ткачев А.А. Элементы привода приборов: расчет, конструирование, технологии. Минск. Беларус. Навука. – 2012.
151. Стржемячный М.М., Хренов А.С. Компьютерное проектирование процессов механической обработки деталей на многопрофильных станках с ЧПУ на основе анализа объемных технологических размерных цепей [Электронный ресурс]. Режим доступа:

- http://www.mami.ru/science/mami145/scientific/article/s07/s07_38.pdf. –
(Дата обращения: 08.01.2015).
152. Сухоруков Ю.Н. Модификация эвольвентных цилиндрических зубчатых колес. Киев, Техника, 1992.
153. Сысоев А.С., Сысоев С.К., Левко В.А., Снетков П.А., Зверинцева Л.В. Исследование процесса хонингования заготовок трубопроводов для летательных аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. Академика М.Ф. Решетнева. Изд-во: Сибирский государственный аэрокосмический университет им. Академика М.Ф. Решетнева. – 2005. - № 3. – С. 248-252.
154. Татаринов И.В. Механоэлектрохимическая обработка упрочненных зубчатых колес: дис. канд. техн.наук: 05.02.07 / Татаринов Игорь Владимирович. – Тула, 2010.- 132 с.
155. Тимофеев Б.П., Уланов А.А. Кинематика традиционных зубчатых передач. [Электронный ресурс] // Теория механизмов и машин. – 2013. - №2. Том 11, стр. 73-87. Режим доступа: <http://tmm.spbstu.ru/22/timofeev.pdf>. - (Дата обращения: 09.01.2015).
156. Трубачев Е.С., Логинов С.Е., Богданов К.В. Разработка новой технологии нарезания зубьев спироидных колес//Вестник СевНТУ – 2014. -№151, стр. 192-197.
157. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимости мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щетками // Механика машин, механизмов и материалов. – 2012. - № 1 (18). – С. 75-79.
158. Филоненко-Бородич М. М., Изюмов С. М., Олисов Б. А., Мальгинов Л.И. Курс сопротивления материалов: Учебник для вузов/ Под общ. ред. М. М. Филоненко-Бородина. М. Физматгиз, 1961.
159. Фингер М.Л. Цилиндрические зубчатые колеса. Теория и практика изготовления. – М.: Научная книга, 2005 – 368 с.

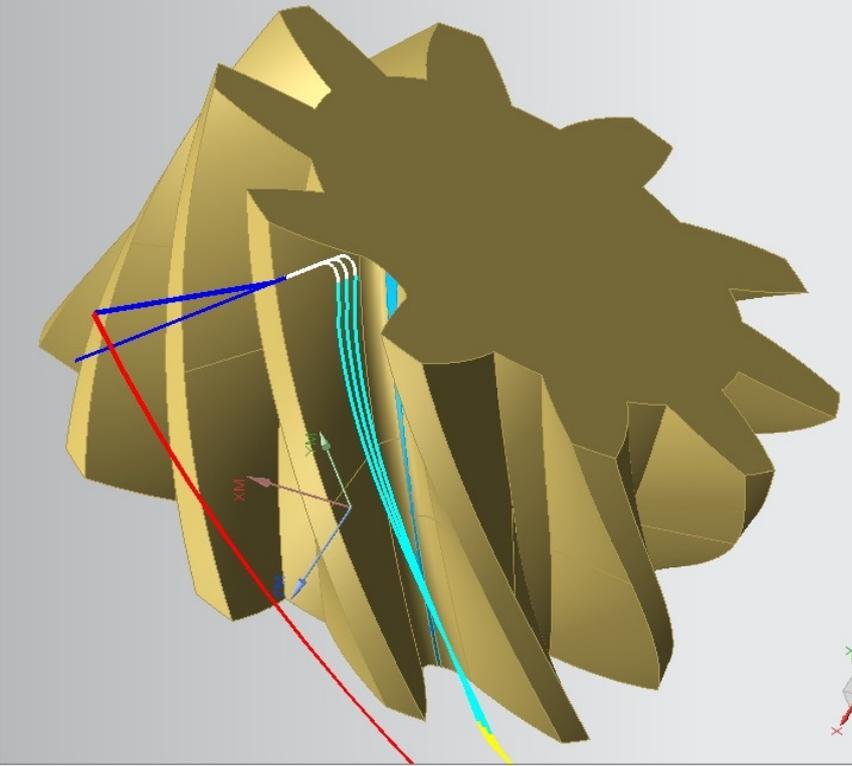
160. Фрадкин Е.И. Выполнение среза головки эвольвентной формы на зубошлифовальных станках в условиях единичного производства // Вестник машиностроения. – 1999. - №8. – С.34-39.
161. Цуканов О.Н. Повышение нагрузочной способности цилиндрико-конических зубчатых передач на основе метода проектирования в обобщающих параметрах [Электронный ресурс]: автореф. дис. канд.тех.наук: 05.02.02. / Цуканов Олег Николаевич. - Челябинск, 1999. Режим доступа: http://www.lib.susu.ac.ru/ftd?base=SUSU_DISSER&key=000297275&dtype=F&etype=.pdf. - (Дата обращения: 16.01.2015).
162. Чапышев А.П., Иванова А.В., Крючкин А.В. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей // Известия Самарского научного центра Российской Академии Наук. Изд-во: Самарский научный центр РАН (Самара). – 2013. – Том 15. - № 6-2. – С. 533-537.
163. Шамов С.А. Автоматизация подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ в условиях информационно-технологической среды: дис. канд. техн. наук: 05.13.06./ Шамов Сергей Александрович. – Москва, 2011. – 114с.
164. Шевелева Г.И. Теория формообразования и контакта движущихся тел. Монография. М.: 1999.
165. Шевелева Г.И. Решение одной задачи теории огибающей // Машиноведение. – 1976. - № 6. – С.48 - 53.
166. Шишков В.А. Образование поверхностей резанием по методу обката. М.: Машгиз, 1951. – 152 с.
167. Шорр Б.Ф. , Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: Справочник – М.: Машиностроение, 1979.
168. Шувал-Сергеев Н.А. Методы и средства моделирования операционных заготовок деталей: автореф. дис. канд.тех.наук: 05.11.14 / Шувал-Сергеев Никита Александрович. - СПб, 2010.

169. Юнусов Ф.С. Формообразование сложнопрофильных поверхностей шлифованием. М.: Машиностроение: 1987.
170. Юнусов Ф.С., Краснова Н.В. Математическое моделирование процесса формообразования винтовых поверхностей аэродинамического профиля. // Прогрессивные методы обработки деталей летательных аппаратов и двигателей: Межвузовский сборник научных трудов. - Казань: КАИ, 1978.
171. Юнусов Ф.С., Лунев А.Н., Юнусов Р.Ф. Формообразование сложно-профильных и крупногабаритных поверхностей полусвободным инструментом: Монография. Казань: Изд-во Казан. гос.техн. ун-та, 2011. - 280с.
172. Яблочников Е.И. Автоматизация технологической подготовки производства в приборостроении. Санкт-Петербург, 2002 - 92 с.
173. Яблочников Е.И., Куликов Д.Д., Молочник В.И. Моделирование приборов, систем и производственных процессов: Учебное пособие – СПб: СПбГУИТМО, 2008. – 156с.
174. Янгулов В.С. Проектирование передач с линейными перемещениями выходного звена: учебное пособие/В.С. Янгулов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 169 с.
175. A.E. Volkov, V.I. Medvedev, I.V. Zhuchkov. Machining of gears with circular teeth by means of an eccentric modifier. Russian Engineering Research, 2010, Vol. 30, No. 3, pp. 243–250. Allerton Press, 2010
176. Cheng Wang, Zong-de Fang and Hai-tao Jia. Investigation of a Design Modification for Double Helical Gears Reducing Vibration and Noise. Journal of Marine Science and Application, March 2010, Volume 9, Issue 1, pp 81-86
177. Cihan Özel. Research of production times and cutting of the spur gears by end mill in CNC milling machine//The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, April 2011, Volume 54, Issue 1-4, pp 203-213
178. Damir T. Jelaska. Gears and Gear Drives, Wiley, 2012

179. Demidov V.V., Gus'kova E.V. Precision in machining spur gears by hobs with positive rake angles. Russian Engineering research. Volume 32, Issue 7-8, pp. 553-557.
180. Dr.-Ing. Hartmut Möller. Face-off: Face Hobbing vs. Face Milling. Available at: <http://www.gearsolutions.com/article/detail/5362/face-off-face-hobbing-vs-face-milling>
181. Huselin Imrek. Width modification for gears with low contact ratio. Meccanica, October 2009, Volume 44, Issue 5, pp 613-621
182. F.L. Litvin. Development of Gear Technology and Theory of Gearing/NASA Reference Publication 1406. 1998. 124 p.
183. Miryam B. Sánchez, José I. Pedrero, Miguel Pleguezuelos. Tooth-root stress calculation of high transverse contact ratio spur and helical gears. Meccanica, February 2014, Volume 49, Issue 2, pp 347-364
184. Radzevich, S.P. Dudley's handbook of practical gear design and manufacture, CRC Press, Boca Ration, 2012.
185. Radzevich, S.P. Theory of gearing: Kinetics, Geometry and Synthesis, CRC Press, 2012.
186. Radzevich, S.P. Gear Cutting Tools: Fundamentals of Design and Computation, CRC Press, Boca Ration, FL, 2010.
187. Robert F.Handschuh, Michael Nanlawala, John M.Hawkins, Danny Mahan. Experimental Comparison of Face-Milled and Face-Hobbed Spiral Bevel Gears//Nasa/TM-2001-210940, Available at: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20020006307.pdf>
188. <http://ru.dmgmori.com/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82%D1%8B/lasertec/lasertec-shape/lasertec-65-shape#Control>.
189. Tong Jia, LangFang City, Yan Duan. Patent:United States, Pub. No.: US2014/0056657, Pub.Date: Feb.27, 2014

190. V. Abadjiev, E. Abadjieva, D.Petrova. Synthesis of hyperboloid gear sets based on the pitch point approach, Mechanism and Machine Theory, Vol. 55, pp. 51-66.
191. V. Atanasiu, D. Leohchi. Evaluation of Engagement Accuracy by Dynamic Transmission Error of Helical Gears. Mechanisms and Machine Science, Volume 5, 2010, pp 421-428
192. Valentin Abadjiev, Emilia Abadjieva. Computer syntesis approaches of hyperboloid gear drives with linear contact/Journal of Theretical and Applied Mechanics, Sofia, vol. 44, No. 3, pp. 3-20.
193. Victor Griбанov, Denis Ratov, Tatiana Balitskaya, Nataliya Korobka, Tatiana Pecholat, Anna Smorodina. Simulation of hyperboloid gears modelling, TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. - ol PAN, 2009, 9, 54-60, avaluable at: <http://www.pan-ol.lublin.pl/wydawnictwa/TMot9/Griбанov.pdf>

Приложение 1. Дерево создания управляющей программы черновой обработки зубьев с указанием времени обработки зубчатого колеса с параметрами: $m_n = 3$, $z=10$, $\alpha_n = 24^0$, $\beta_w = 45^0$, $B = 24$ мм, направление винтовой линии – правое.



Имя	Смена инстру...	Траектория	Инструмент	Время
NC_PROGRAM				03:03:22
Неиспользуемые объекты				00:00:00
PROGRAM				03:03:22
CHERN_KANAL				03:03:22
! VARIABLE_CONTOUR	!	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANCE	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_1	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_1	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_2	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_2	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_3	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_3	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_4	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_4	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_5	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_5	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_6	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_6	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_7	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_7	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17
! SIDE_1_INSTANCE_8	✓	✓	DORMER_S006	00:07:33
! SIDE_2_INSTANCE_8	✓	✓	DORMER_S006	00:07:50
! VARIABLE_CONTOUR_INSTANC...	✓	✓	DORMER_S006	00:01:17

Приложение 2. Патент на изобретение.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2323069

ГРЕБЕНЧАТАЯ ФРЕЗА

Патентообладатель(ли): *Казанский государственный
технический университет им. А.Н. Туполева (RU)*

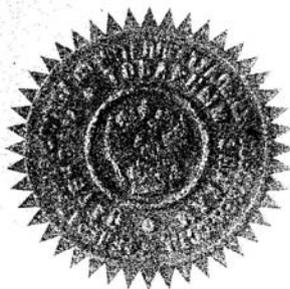
Автор(ы): *Печенкин Михаил Владимирович (RU)*

Заявка № 2006120217

Приоритет изобретения 08 июня 2006 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 27 апреля 2008 г.

Срок действия патента истекает 08 июня 2026 г.



Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов

и. 13.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2341357

**СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГИПЕРБОЛОИДНЫХ
ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС**

Патентообладатель(ли): **Министерство образования и науки
Российской Федерации Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Казанский государственный
технический университет им. А.Н. Туполева (КГТУ-КАИ) (RU)**

Автор(ы): **Печенкин Михаил Владимирович (RU)**

Заявка № 2007105650

Приоритет изобретения **05 февраля 2007 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **20 декабря 2008 г.**

Срок действия патента истекает **05 февраля 2027 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



9.6/2007 - Кар. МД
С. ПУД 26.12.2008

н14

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 87112

ГИПЕРБОЛОИДНАЯ ЗУБЧАТАЯ ПЕРЕДАЧА

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева (RU), Печенкин Михаил Владимирович (RU)*

Автор(ы): *Печенкин Михаил Владимирович (RU)*

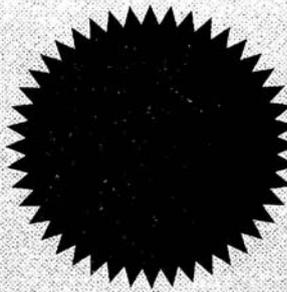
Заявка № 2009118790

Приоритет полезной модели 18 мая 2009 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 27 сентября 2009 г.

Срок действия патента истекает 18 мая 2019 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

Приложение 5. Акт внедрения ООО «АДЕМ-Центр»



107497, Россия, г. Москва, ул. Иркутская, д. 11, к. 1
Тел./Факс: (495) 502-13-41, 462-01-56, E-mail: moscow@adem.ru, WEB: www.adem.ru

ООО «АДЕМ-Центр»



«Утверждаю»

Исполнительный директор
ООО «АДЕМ-Центр»

 / В.В. Силин
«04» марта 2016 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Комиссия в составе: В.Г. Карповский, К.С. Карабчиев – специалисты CAD/CAM группы компаний АДЕМ, составила настоящий акт о внедрении на ООО "АДЕМ-Центр" результатов диссертационного исследования Печенкина М.В. в части математических зависимостей для получения геометрических моделей и кинематики многокоординатного формообразования зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперboloид вращения.

Использованные алгоритмы позволили впервые получить геометрические модели таких зубчатых колес в модуле ADEM CAD, а опробованная кинематика многокоординатного формообразования зубчатого колеса с параметрами $a_w=50,91$ мм, $m_n = 3$, $z=12$, $\alpha_n = 24^0$, $\beta_w = 450$, $B = 40$ мм, направление винтовой линии – правое в модуле ADEM CAM позволила снизить время многокоординатной обработки таких зубчатых колес на 12%.

(В.Г. Карповский)

(К.С. Карабчиев)

Приложение 6. Акт промышленного опробования АО «Вакууммаш».

Утверждаю

Главный инженер

АО «Вакууммаш»

Голоднов С.Ю.

«18» марта 2016 г.



АКТ

опробования научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Разработка Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, а именно: технология многокоординатного формообразования зубчатых колес на заготовке вида однополостной гиперboloид вращения.

(полное наименование разработки)

выполненная по договору о сотрудничестве

хозяйственному, госбюджету, (внутриминистерскому, внутриведомственному) заказам, договору на передачу научных достижений, договору о сотрудничестве, номер и индекс темы, даты начала и окончания

переданная АО «Вакууммаш»

(наименование организации заказчика)

опробована 18 марта 2016 г. на (в)

(месяц) (год)

АО «Вакууммаш»

организация (предприятие), где опробована разработка

в составе: математических зависимостей расчета образующей линии зубьев по их длине, математической модели, реализующей кинематику многокоординатного формообразования зубчатых колес на заготовке вида «однополостной гиперboloид вращения», управляющих программ многокоординатного формообразования зубьев

(наименование объекта, системы, в составе которых нашла практическое применение разработка или в качестве самостоятельного объекта)

в соответствии с договором о сотрудничестве

(документы, на основании которых производилось внедрение разработки)

Назначение внедренной разработки: снижение массогабаритных характеристик приводов

(конкретные функции внедренной разработки)

вакуумного технологического оборудования, повышение нагрузочной способности приводов, снижение массогабаритных характеристик

Технический уровень разработки:

патенты на изобретение № 2341357, № 232069

(№ патентов, лицензий)

патент на полезную модель № 87112.

Вид внедрения: выполнение уникальных опытных образцов зубчатых колес

(эксплуатация изделий и сооружений, изготовление продукции серийное, уникальное, единичное производство, выполнение производственных работ, проектные разработки, научные исследования)

**Приложение 7. Акт промышленного опробования АО «Вакууммаш»
(продолжение).**

Эффективность опробования.

1. Организационно-технические преимущества: произведено сравнение времени
(параметры, характеризующие степень
предварительной фрезерной обработки двух зубчатых колес с параметрами $a_w=50,91$ мм,
 $m_n = 3, z=12, \alpha_n = 24^\circ, \beta_w = 450, B = 40$ мм, направление винтовой линии – правое с
использованием концевых фрез и с использованием модульной дисковой фрезы на станке с
ЧПУ по разработанной программе. Время обработки концевым фрезерным инструментом
на станке с ЧПУ составило 7 часов, дисковой модульной фрезой – 15 минут.
качественного улучшения функциональных или эксплуатационных показателей по сравнению с базовым или заменяемым вариантом)
2. Социальный эффект развитие перспективных научных разработок высоконагруженных
(подробно раскрыть конкретный вид эффекта:
приводов вакуумного технологического оборудования
защита здоровья человека, охрана окружающей среды, повышение престижа страны, развитие науки и научных исследований)
3. Экономический эффект от опробования разработки достигается снижением времени
(количественная характеристика
обработки, экономии материала за счет снижения массогабаритных характеристик привода
экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов, сокращения капитальных вложений, повышение качества продукции)
- При этом получен фактический годовой экономический эффект с момента опробования
в денежном выражении не определялся
(сумма цифрами и прописью)

От предприятия:

Ответственный за внедрение

Нат. Произв. Бугаев
(должность, Ф.И.О.)

Травный Техносол
(должность, Ф.И.О.)

От КНИТУ КАИ:

Ответственный за внедрение

Зав. каф. «ТМП» Шубаев Р.М.
(руководитель темы, Ф.И.О.)

Исполнители:

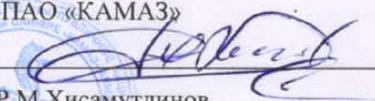
доцент каф. ТМП
(должность, Ф.И.О.)
Печенкин М.В.

Приложение 8. Акт внедрения ПАО «КамАЗ»

Утверждаю

Директор технологического центра

ПАО «КАМАЗ»


Р.М.Хисамутдинов

«18» января 2016 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Разработка Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, а именно: Технология формообразования гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной знакопеременной кривизны.

(полное наименование разработки)

выполненная по гранту «Перспективные экологичные колесные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат»

хоздоговору, госбюджету, (внутриминистерскому, внутриведомственному) заказам, договору на передачу научных достижений, договору о сотрудничестве, номер и индекс темы, даты начала и окончания

переданная ТЦ ПАО «КАМАЗ»

(наименование организации заказчика)

внедрена с января месяца 2016 года на (в) ТЦ ПАО «КАМАЗ»

организация (предприятие), где внедрена разработка

в составе: Математической модели управления осью инструмента при обработке зубьев, управляющей программы фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес.

(наименование объекта, системы, в составе которых нашла практическое применение разработка или в качестве самостоятельного объекта)

в соответствии с грантом «Перспективные экологичные колесные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат»

(документы, на основании которых производилось внедрение разработки)

Назначение внедренной разработки: повышение нагрузочной способности главной передачи автомобиля «КАМАЗ»

(конкретные функции внедренной разработки)

Технический уровень разработки: патенты на изобретение № 2341357, № 232069, патент на полезную модель № 87112.

(№ патентов, лицензий)

Вид внедрения: изготовление уникальных опытных образцов зубчатых пар

(эксплуатация изделий и сооружений, изготовление продукции серийное, уникальное, единичное производство, выполнение производственных работ, проектные разработки, научные исследования)

Эффективность внедрения.

1. Организационно-технические преимущества: создание высоконагруженных главных передач зубчатых колес перспективных грузовых автомобилей

(параметры, характеризующие степень качественного улучшения функциональных или эксплуатационных показателей по сравнению с базовым или заменяемым вариантом)

2. Социальный эффект: снижение выбросов грузового автомобиля «КАМАЗ» повышением

Приложение 9. Акт внедрения ПАО «Камаз» (продолжение)

экономичности вследствие снижения массогабаритных характеристик привода

(подробно раскрыть конкретный вид эффекта: защита здоровья человека, охрана окружающей среды, повышение престижа страны, развитие науки и научных исследований)

3. Экономический эффект от внедрения разработки: достигается повышением нагрузочной способности и долговечности работы привода, снижением массогабаритных характеристик

(количественная характеристика экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов, сокращение капитальных вложений, повышение качества продукции)

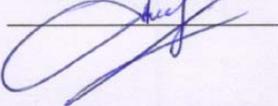
При этом получен фактический годовой экономический эффект с момента внедрения в денежном выражении: не определяется

(сумма цифрами и прописью)

От предприятия:

Ответственный за внедрение
Заместитель главного технолога
ПАО "КАМАЗ" по НР и ИМ
Пашков М.В.

(должность, Ф.И.О.)



(должность, Ф.И.О.)

От КНИТУ КАИ:

Ответственный за внедрение

Зав. кафедр. ТМД Рибачев Р.М.
(руководитель темы, Ф.И.О.)

Исполнители:

доцент кафедр. ТМД
(должность, Ф.И.О.)

Печенкин А.Б.

Приложение 10. Акт промышленного опробования ПАО «КамАЗ».

Утверждаю

Директор технологического центра
ПАО «КАМАЗ»



[Handwritten signature]
Р.М.Хисамутдинов

«18» января 2016 г.

АКТ

опробования результатов научно-исследовательской (опытно-конструкторской) работы

Разработка Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева, а именно: Технология формообразования гиперболоидных зубчатых колес с зубьями двойной знакопеременной кривизны.

(полное наименование разработки)

выполненная по гранту «Перспективные экологичные колесные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат»
хоздоговору, госбюджету, (внутриминистерскому, внутриведомственному) заказам, договору на передачу научных достижений, договору о сотрудничестве, номер и индекс темы, даты начала и окончания

переданная ТЦ ПАО «КАМАЗ»

(наименование организации заказчика)

опробована с января месяца 2016 года на ТЦ ПАО «КАМАЗ»

организация (предприятие), где внедрена разработка

в составе: Математической модели управления осью инструмента при обработке зубьев, управляющей программы фрезерования зубьев гиперболоидных зубчатых колес.

(наименование объекта, системы, в составе которых нашла практическое опробование разработка или в качестве самостоятельного объекта)

в соответствии с грантом «Перспективные экологичные колесные транспортные средства с высокими потребительскими свойствами и низким уровнем эксплуатационных затрат»

(документы, на основании которых производилось опробование разработки)

Назначение опробованной разработки: повышение нагрузочной способности главной передачи автомобиля «КАМАЗ»

(конкретные функции внедренной разработки)

Технический уровень разработки: патенты на изобретение № 2341357, № 232069, патент на полезную модель № 87112.

(№ патентов, лицензий)

Вид опробования: выполнение опытных образцов

(эксплуатация изделий и сооружений, изготовление продукции серийное, уникальное, единичное производство, выполнение производственных работ, проектные разработки, научные исследования)

Эффективность опробованного промышленного образца.

1. Организационно-технические преимущества: создание высоконагруженных главных передач зубчатых колес перспективных грузовых автомобилей

(параметры, характеризующие степень качественного улучшения функциональных или эксплуатационных показателей по сравнению с базовым или заменяемым вариантом)

**Приложение 11. Акт промышленного опробования ПАО «КамАЗ»
(продолжение).**

2. Социальный эффект: снижение выбросов грузового автомобиля «КАМАЗ» повышением экономичности вследствие снижения массогабаритных характеристик привода

(подробно раскрыть конкретный вид эффекта: защита здоровья человека, охрана окружающей среды, повышение престижа страны, развитие науки и научных исследований)

3. Экономический эффект от внедрения разработки: достигается повышением нагрузочной способности и долговечности работы привода, снижением массогабаритных характеристик

(количественная характеристика экономии материальных, энергетических и трудовых ресурсов, сокращение капитальных вложений, повышение качества продукции)

При этом получен фактический годовой экономический эффект с момента внедрения в денежном выражении: не определяется

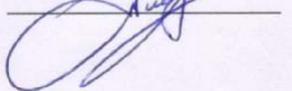
(сумма цифрами и прописью)

От предприятия:

Ответственный за внедрение

Заместитель главного технолога
ПАО "КАМАЗ" по НР и ИМ
Пашков М.В.

(должность, Ф.И.О.)



(должность, Ф.И.О.)

От КНИТУ КАИ:

Ответственный за внедрение

Зав. кафедр. ТМП Губов Р.М.

(руководитель темы, Ф.И.О.)

Исполнители:

доцент кафедр. ТМП

(должность, Ф.И.О.)

Геченкин М.В.