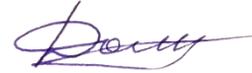


На правах рукописи



Домнин Петр Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНСТРУМЕНТА
ПРИ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ, В ТОМ
ЧИСЛЕ ВИНТОВЫХ, ПОВЕРХНОСТЕЙ НА БАЗЕ
ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Специальность 2.5.5
«Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена на кафедре инструментальной техники и технологии формообразования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва.

Научный консультант:

Петухов Юрий Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инструментальной техники и технологии формообразования федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Официальные оппоненты:

Артамонов Евгений Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Станки и инструменты» Института промышленных технологий и инжиниринга федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень.

Куликов Михаил Юрьевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология транспортного машиностроения и ремонта подвижного состава» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта», г. Москва.

Попов Андрей Юрьевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва

Защита состоится «06» июня 2023 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», по адресу: 127994, ГСП-4, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: https://stankin.ru/pages/id_115/page_1337.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.332.01, к.т.н.



Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современная промышленность характеризуется значительным ростом создания, освоения и внедрения в производство новых высокоэффективных технологий, обеспечивающих рост производительности, улучшение качества выпускаемой продукции, повышение ее конкурентоспособности. Это влечет за собой усложнение узлов и деталей продукции, разработку и использование новых материалов, что требует развития станков, режущих инструментов и методов обработки.

Основным способом достижения необходимой точности и качества поверхностного слоя деталей в металлообработке является механическая обработка и, в частности, обработка резанием. Каждый элемент технологической системы СПИД играет важную роль в процессе механической обработки, но режущий инструмент требует особого внимания, так как быстрее изнашивается по сравнению с другими элементами системы и в большей мере влияет на качество и эффективность процесса обработки.

Особое место среди машиностроительной продукции занимают различные детали с фасонными и, в частности, винтовыми поверхностями. Наиболее часто такие поверхности являются периодическими; к ним относят стружечные канавки инструментов (сверла, концевые фрезы), зубчатые колеса различного назначения, шлицевые валы, роторы насосов и т.д. Обработка таких деталей наиболее часто осуществляется дисковыми инструментами стандартного или фасонного профиля, либо инструментами, работающими по методу обкатки, например, червячными фрезами.

Современное направление исследований в области сложных процессов формообразования в основном направлено на переход от ручных методов проектирования к компьютерным. Однако фундаментальные основы ранее известных методов проектирования содержат в себе элементы упрощения инженерных расчетов, заложенные еще до появления компьютера.

В частности, применяется традиционный метод профилирования червячных фрез, который построен на поиске общей касательной и состоит из двух этапов. На первом определяют профиль сопряженной с деталью косозубой рейки и только на втором – сопряженный с рейкой профиль червячной фрезы. Метод неприменим, если отсутствует общая касательная у сопряженных профилей, а также если исходный профиль задан координатами отдельных точек или пространственной кривой. Эти методики транслируют в прикладные программы, что упрощает и ускоряет сам процесс проектирования, но не приводит к качественным улучшениям.

В связи с этим, в целях перехода к передовым цифровым технологиям и способам проектирования, требуется разработка новых, современных подходов к проектированию инструментов для сложных процессов формообразования. Они должны учитывать не только профили инструментальной и исходной поверхностей, а также параметры установки, но и движения процесса формообразования, а также его режимы (подача, глубина резания). Необходимость в этом диктуется требованиями к уровню автоматизации

современных машиностроительных производств. Конструкция инструмента должна учитывать возможности современных многокоординатных станков с ЧПУ как на стадии изготовления самого инструмента, так и на стадии его эксплуатации.

Комплексное решение поставленных задач возможно только на базе широкого применения вычислительной техники и создания специализированных систем автоматизированного проектирования режущих инструментов. В основе этих систем должны лежать средства автоматизации, позволяющие синтезировать алгоритмы решения задач проектирования, которые учитывают не только разработку конструкции и технологию изготовления инструмента, но и нюансы, связанные с его эксплуатационными показателями.

Степень разработанности темы исследования. Имеется обширный ряд научных работ и публикаций, в которых исследованы сложные процессы формообразования фасонных винтовых поверхностей, а также методы проектирования инструмента для обработки таких поверхностей. Часть из этих работ посвящена общим задачам обработки винтовых поверхностей, а также погрешностям при обработке и методам повышения точности. Среди отечественных авторов стоит отметить работы Семенченко И. И., Агаркова А. А., Борисова А. Н., Борискина О. Н., Воробьева В. М., Гречишников В. А., Илюхина С. Ю., Иноземцева Г. Г., Кирсанова Г. Н., Колесова Н. В., Коганова И. А., Кузнецова В. А., Лашнева С. И., Литвина Ф. Л., Люкшина В. С., Петухова Ю. Е., Протасьева В. Б., Родина П. Р., Сахарова Г. Н., Цвиса Ю. В., Цепкова А. В., Юликова М. И., Шевелевой Г. И. и др. Среди зарубежных исследователей стоит отметить работы Radzevich S.P. (США), Н. Pottmann, Wien, and Т. Randrup (Австрия), Fulin Wang, Chuanyun Yi, Tao Wang, Gang Zhao (Китай). Разработкой прикладных программных продуктов в области сложных процессов формообразования занимается ряд зарубежных фирм: Walter, LMT Tools, Samputenseli и др.

Рассматривая инструмент, работающий по методу обкатки, необходимо выделить механизмы эвольвентного зубчатого зацепления, которые наиболее часто изготавливаются с помощью таких инструментов. Вопросами профилирования зубчатых колёс, обоснованием и развитием теории эвольвентного зацепления занимался еще Леонард Эйлер и ряд авторов: Л. Камус, Ф. Савари, Т. Оливье, Х. И. Гохман и др. Они заложили основы развития методов проектирования инструментов, работающих по методу обкатки. Подход к решению задач профилирования инструментов, как к объектам зубчатого зацепления, широко распространен.

Однако в работе Кирсанова Г. Н. была выдвинута гипотеза, что нельзя полностью переносить кинематические критерии сопряженности поверхностей из теории зацепления в область обработки режущим инструментом. Доказана эта гипотеза была в работе Петухова Ю. Е. Имеется также описание общих математических моделей на основе методов математического моделирования и оптимизации (Петухов Ю. Е., Колесов Н. В., Гречишников В. А. и др.) применительно к процессам формообразования и профилированию

инструмента. Однако, несмотря на глубокую проработанность темы можно выделить ряд нерешённых проблем:

1. Требуется дальнейшего исследования и проработки единый подход к решению прямой и обратной задач профилирования при обработке фасонных винтовых поверхностей, который охватывал бы значительную часть разновидностей инструментов и технологических процессов.
2. При проектировании на отечественных и зарубежных предприятиях применяют исключительно традиционный метод профилирования червячных фрез, который построен на поиске общей касательной и состоит из двух этапов. На первом определяют профиль сопряженной с деталью косозубой рейки и только на втором – сопряженный с рейкой профиль червячной фрезы. Метод неприменим, если отсутствует общая касательная у сопряженных профилей, а также если исходный профиль задан координатами отдельных точек или пространственной кривой.
3. Существуют математические зависимости, которые устанавливают взаимосвязи между формой обрабатываемой поверхности и формой профиля червячной фрезы, однако они не в полной мере учитывают изменения параметров установки инструмента относительно обрабатываемой детали, тем более, когда речь заходит об изменениях этих параметров в процессе обработки, что вполне возможно на современных станках с ЧПУ.
4. Требуется большего развития методы решения обратных задач профилирования при обработке винтовых поверхностей червячными инструментами в направлении перехода от плоских к пространственным вычислениям, с учетом не только формы инструментальной поверхности, кинематики процесса и параметров установки, но и режимов обработки.
5. В достаточно полной мере формализованы методы формирования схем резания при обработке фасонных винтовых поверхностей инструментами на базе дисковой, цилиндрической и торцевой инструментальных поверхностей, однако требует разработки и дальнейших исследований метод определения схемы резания и толщин срезаемых слоев при обработке винтовых поверхностей, в том числе по методу обкатки.
6. Требуется развития и формализации единый подход формирования математических моделей, которые позволят производить построение схем резания процессов обработки фасонных винтовых поверхностей фасонными червячными фрезами, дисковыми фасонными фрезами и инструментами стандартного профиля.

Цель диссертационного исследования состоит в повышении эффективности червячных, дисковых, концевых и торцевых фрез для обработки деталей со сложнопрофильными, и в том числе винтовыми, поверхностями путем повышения точности, производительности и минимизации затрат на подготовку производства, за счет моделирования процесса формообразования и резания на базе численного представления этих поверхностей и процесса формообразования.

Объектом диссертационного исследования являются процессы формообразования деталей со сложнопрофильными, и в том числе винтовыми

поверхностями фасонными и стандартными червячными, торцевыми и концевыми фрезами.

Предметом диссертационного исследования являются методы и алгоритмы решения прямых и обратных задач профилирования инструментов для обработки фасонных винтовых поверхностей. Для достижения приведенной выше цели были поставлены следующие задачи:

Задачи диссертационного исследования:

1. Разработать общую методику формирования алгоритмов профилирования инструментов для обработки фасонных винтовых поверхностей, которые учитывают кинематику процесса формообразования, параметры установки инструмента относительно обрабатываемой детали, форму обрабатываемой поверхности детали и режимы обработки.
2. Установить математические зависимости между размерами и формой профиля винтовой поверхности, формой профиля инструмента червячного и цилиндрического типа, параметрами установки, числом заходов и режимами обработки при обработке винтовых фасонных поверхностей для решения прямых и обратных задач профилирования.
3. Разработать общую модель формирования схемы резания фасонной винтовой поверхности инструментом на базе червячной и цилиндрической инструментальной поверхностей с учетом процесса формообразования и резания.
4. Разработать общий подход к формированию математических и трехмерных моделей процесса обработки фасонных винтовых поверхностей в формате симулятора.
5. Разработать параметрические математические модели фасонных, и в том числе винтовых поверхностей деталей и инструментов с периодическими профилями, которые широко применяют в технике.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный унифицированный подход к решению задач профилирования, как режущих инструментов, работающих по методам обкатки и копирования, так и фасонных деталей, обработанных указанными инструментами, реализующий определение профиля инструмента (детали), в том числе за счет формализации формирования схемы резания, построенной на основе определения размеров срезаемых слоев, с учетом совокупности факторов, характеризующих процессы формообразования и резания.
2. Метод решения прямой задачи профилирования червячных фрез, позволяющий проектировать инструмент с заданной точностью, производить расчет в один этап минуя определение профиля сопряженной с деталью косозубой рейки, что открывает возможности применения червячных фрез, в том числе многозаходных для обработки винтовых поверхностей произвольного профиля взамен дискового инструмента, с повышением производительности не менее чем в 2.5 раза.
3. Метод решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных и, в том числе винтовых, поверхностей, позволяет оценить влияние параметров установки на форму обрабатываемой поверхности, оценить верность решения

прямой задачи профилирования, позволяет определить параметры установки инструмента в случае применения инструмента стандартного профиля.

4. Метод определения схемы резания и толщин срезаемых слоев, позволяющий в зависимости от кинематики процесса обработки, конструкции инструмента и подачи, формировать схемы резания с последующим анализом изменения кинематических задних углов в процессе обработки, и применимый для различных случаев сложных процессов формообразования, являющийся отдельным самостоятельным методом решения обратной задачи профилирования.

Научная новизна работы состоит:

- В унифицированной структуре проектирования специальных режущих инструментов, сформированной на основе установленных взаимосвязей и включающей: расчетные схемы и математические модели, компьютерные симуляции при решении прямых и обратных задач профилирования, определения размеров срезаемых слоев, схем резания, применительно к широкой гамме режущих инструментов: фасонных и стандартных червячных, дисковых и концевых фрез при обработке фасонных винтовых поверхностей деталей.
- В расчетных схемах, математических моделях и компьютерных симуляциях процесса профилирования, сформированного на основе построения огибающей проекций направляющих линий на исходной поверхности при ее дискретных положениях, с учетом кинематики процесса формообразования, построенных во взаимосвязях между исходными профилями детали или инструментальной поверхности, параметрами их установки, применительно к червячным и дисковым инструментам при обработке фасонных, и в том числе винтовых, поверхностей деталей.
- В расчетных схемах, математических моделях и компьютерных симуляциях определения размеров срезаемых слоев, на основе формирования траекторий движения двух соседних зубьев инструмента, построенных на взаимосвязях между исходной инструментальной поверхностью, параметрами ее установки относительно детали, режимами резания и кинематикой процесса формообразования.
- В расчетных схемах, математических моделях и компьютерных симуляциях построения схемы резания, на основе формирования следов от режущих кромок зубьев инструмента при формообразовании профиля детали, построенных на взаимосвязях между, профилем исходной инструментальной поверхности, параметрами установки, режимами резания, числом зубьев и кинематикой процесса формообразования.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке математического подхода к решению задач профилирования при обработке сложных фасонных, и в том числе винтовых поверхностей, основанного на синтезе численных математических алгоритмов (математических моделей), которые устанавливают взаимосвязи не только между формой инструментальной и формой исходной поверхности, а также параметрами установки инструмента, но и учитывают движения процесса формообразования

и его режимы (подача, глубина резания). Данный подход обеспечивает возможность решения прямых и обратных задач профилирования при формообразовании фасонных винтовых поверхностей дисковыми фасонными фрезами, инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности (концевые и торцевые фрезы), инструментами, работающими по методу обкатки.

Практическая значимость работы состоит:

- в рекомендациях по математическому и трехмерному моделированию для решения прямой задачи профилирования червячных фрез, позволяющей производить исследование полученных решений с учетом параметров установки, заданных диапазоном значений, что обеспечивает повышение точности профилирования и позволяет производить поиск наиболее технологичных решений;
- в рекомендациях по моделированию процесса формообразования фасонных (в том числе винтовых) поверхностей в рамках решения обратной задачи профилирования для организации симулятора, позволяющего производить исследование процесса формообразования фасонных, и в том числе винтовых поверхностей дисковыми фасонными фрезами, инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности (концевые и торцевые фрезы), инструментами, работающими по методу обкатки, с учетом конструктивных особенностей инструментов, параметров установки и режимов работы;
- в рекомендациях по определению параметров установки, характеристик и размеров инструмента для формообразования фасонных, и в том числе винтовых, поверхностей инструментами, работающими по методу обкатки, дисковыми фасонными фрезами, инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности (концевые и торцевые фрезы), что обеспечивает расширение технологических возможностей инструмента, повышает его надежность, работоспособность и способствует повышению точности обработки;
- в рекомендациях по реализации математических моделей для решений прямых и обратных задач профилирования при формообразовании фасонных винтовых поверхностей в среде графического трехмерного моделирования T-flex CAD 3D, что способствует минимизации затрат на подготовку производства деталей с периодическими фасонными (в том числе винтовыми) поверхностями;
- в рекомендациях по назначению задних углов инструмента в зависимости от изменения кинематических задних углов вдоль режущей кромки в процессе формообразования фасонных, и в том числе винтовых поверхностей инструментами, работающими по методу обкатки, дисковыми фасонными фрезами, инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности (концевые и торцевые фрезы), что обеспечивает повышение стойкости инструмента и повышает надежность процесса обработки;

- в рекомендациях по оценке загрузки различных участков режущей кромки в процессе формообразования на основании определения размеров срезаемых слоев при формообразовании фасонных, и в том числе винтовых, поверхностей инструментами, работающими по методу обкатки, дисковыми фасонными фрезами, инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности (концевые и торцевые фрезы), что позволяет повысить надежность процесса обработки.

Методология и методы исследования. В работе использованы основные положения теории проектирования режущих инструментов для обработки фасонных винтовых поверхностей, в частности, методы профилирования и теории огибающих поверхностей. При проведении исследований применялись средства математической алгоритмизации, математического и геометрического моделирования, матричного исчисления, численные математические методы, математические методы аппроксимации и интерполяции, языки программирования высокого уровня (Delphy), средства векторной и трехмерной графики, пакеты программ Mathcad, T-flexи др. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и производственных условиях с использованием промышленного оборудования на производственной базе предприятий ООО «Инструмент», ПАО «МИЗ», ООО «Заря-Инструмент», ООО «Часовое производство «Полет-Хронос», ОАО «Станкоагрегат», а также на базе лабораторий технологического полигона МГТУ «СТАНКИН». Для контроля полученных результатов экспериментов применялись современные прецизионные измерительные машины: Leitz PMM X1, GLOBAL EVO, Walter Helicheck Pro+.

Достоверность полученных результатов, научных положений, рекомендаций и выводов обеспечена согласованием расчетных и экспериментальных данных. Достоверность результатов работы подтверждается сериями теоретических экспериментов, основанных на моделировании, анализе и сравнении результатов профилирования с формой профиля реальных объектов техники и инструментов. Достоверность результатов работы подтверждается сериями теоретических экспериментов, основанных на трехмерном моделировании процессов формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментами на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности, а также инструментами, работающими по методу обкатки. Достоверность полученных результатов проверялась также с помощью множественных экспериментальных исследований в лабораторных и производственных условиях с использованием промышленного и контрольно-измерительного оборудования на производственной базе предприятий: ООО «Инструмент», ПАО «МИЗ», ООО «Заря-Инструмент», ООО «Часовое производство «Полет-Хронос», ОАО «Станкоагрегат», а также на базе лабораторий технологического полигона МГТУ «СТАНКИН».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы многократно докладывались и обсуждались в рамках заседаний кафедры «Инструментальной техники и технологии формообразования», научно-

практических конференций и заседаний научно-технического совета ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН». Отдельные этапы работы докладывались и обсуждались на совместном совещании кафедры «ИТиТФ» МГТУ «СТАНКИН» и ОАО «МИЗ», а также в рамках следующих всероссийских и международных конференций:

- Международная научно-техническая конференция «Автоматизация: проблемы, идеи, решения» (г. Севастополь 6-10 сентября 2010г.);
- XXII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых учёных и студентов «Будущее машиностроения России» (МИКМУС-2010) (Москва, 26-29 октября 2010 г.);
- III Международная научно-практическая конференция «Модернизация машиностроительного комплекса России на научных основах технологии машиностроения (ТМ-2011)» (Брянск, 19-20 мая 2011 г.);
- Международная научно-техническая конференция «Страна живет, пока работают заводы» (Курск, 09-10 декабря 2015 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Реальность – сумма информационных технологий» (г. Курск, 14-15 декабря 2015 г.);
- II международная молодежная научно-техническая конференция «Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов» (г. Курск, 17-18 июня 2016 г.);
- Международная очно-заочная научная конференция «Современные проблемы формообразования сложных поверхностей деталей и сборки машин», посвящённая 100-летию со дня рождения почетного доктора ТулГУ, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР Иосифа Абрамовича Коганова (12.07.1916-12.05.2001) (г. Тула, ТулГУ, 29 сентября 2016 г.);
- Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (г. Москва, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, 24-27 сентября 2019 г.);
- XII Международная конференция «Машиностроение: традиции и инновации» (МТИ - 2019) (г. Москва, 22 октября 2019 г. Организаторы: Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», АО «ЭКСПОЦЕНТР», Ассоциация «Цифровые инновации в машиностроении», Союз Машиностроителей России и др.);
- Всероссийская научно-техническая конференция «Станкостроение и цифровое машиностроение» (07.04.2021 – 09.04.2021). Уфа, 2021.

Результаты работы применялись при подготовке учебных материалов, проведении занятий, а также стажировке на ведущих предприятиях инструментального производства в Италии по программе «Проектирование специального инструмента из наноструктурированных инструментальных материалов с нанопокрывтиями для высокотехнологичных предприятий оборонно-промышленного комплекса и ядерного энергетического

машиностроения» в рамках Президентской программы повышения квалификации инженерных кадров на 2012-2014 годы.

Результаты работы были использованы в рамках выполнения программы научных исследований и разработок получателя гранта Президента Российской Федерации для молодых учёных и аспирантов, осуществляющих перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-1675.2015.5 (тема «Разработка численных методов решения задач формообразования обкаточных инструментов на всех стадиях их жизненного цикла и разработка на этой основе симулятора для многокоординатных станков с ЧПУ»: 2015–2017 гг.).

Результаты работы были использованы в рамках выполнения программы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» на 2011–2016 годы федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» на 2007–2011 годы в рамках выполнения НИОКР:

- «Разработка технологии и оборудования для производства монолитного инструмента из твердых сплавов, модифицированных нанопорошками карбидов тугоплавких металлов» (Государственный контракт № 11411.1003704.05.013 от 30.09.2011 г., шифр «Монолит». Период разработки: 30.09.2011 – 30.03.2013 гг.);
- «Разработка гаммы прецизионного малоразмерного высокопроизводительного режущего инструмента из синтетических сверхтвердых материалов на основе наноструктурированного кубического нитрида бора» (Государственный контракт № 11411.1003704.05.011 от 29.09.2011 г., шифр «Борнитрид». Период разработки: 29.09.2011 – 29.03.2013 гг.);
- «Разработка гаммы отрезного сверхмелкодисперсного алмазного абразивного инструмента для прецизионного резания особо твердых хрупких материалов, создание технологии и оборудования для его производства» (Государственный контракт № 11411.1003704.05.073 от 15.12.2011 шифр «Отрезка». Период разработки: 15.12.2011 – 13.05.2013 гг.);
- «Разработка конструкций специального инструмента для обработки глубоких отверстий в деталях и агрегатах атомного энергомашиностроения» (Государственный контракт №11411.1003704.05.025 от 07.10.2011 г. шифр «Глубина». Период разработки: 07.10.2011 – 06.09.2013 гг.).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

По названию и содержанию материалов диссертационная работа соответствует пп. 3 и 4 раздела «Направления исследований» паспорта специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»:

- Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических

операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки

- Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 75 печатных работ, в том числе 32 работ в журналах, входящих в перечень ВАК, и 10 статей в иностранных журналах, входящих в индекс цитирования SCOPUS, получено 11 патентов РФ на изобретения и 3 патента РФ на полезные модели.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Основной текст содержит 384 страницы. Список литературы состоит из 212 наименований. Приложение выполнено на 26 страницах.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы работы; формулируются цель и задачи исследований; определяются научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов; излагаются доводы о достоверности и апробации работы.

В первой главе приведен аналитический обзор исследований в области сложных процессов формообразования и профилирования инструментов для обработки изделий с фасонными, и в том числе винтовыми, поверхностями.

Для систематизации знаний и оценки степени формализации процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей червячными фрезами был проведен анализ объема и уровня исследованных и установленных функциональных связей между факторами (параметрами конструкции, условиями эксплуатации, параметрами установки) и показателями (показатели работоспособности, качественные показатели и показатели технологичности) процесса обработки.

Анализ большого числа литературных источников, включающих диссертации, монографии, материалы конференций, статьи, патенты и др. позволил определить установленные на момент проведения исследования, как внутренние функциональные связи внутри групп факторов и показателей процесса формообразования, так и внешние – между группами факторов и показателей. Описание столь обширной совокупности взаимосвязей возможно в математической форме и будет представлять собой многомерный массив данных, однако графическое (визуальное) представление требует использования средств трехмерного моделирования. Был сформирован граф взаимосвязей на основе трех граней правильного додекаэдра. На каждой из трех сторон додекаэдра, располагаются три группы факторов и три группы показателей.

На основе графа функциональных связей построены матрицы инцидентий. На примере таких матриц возможно формирование n-мерных массивов данных,

которые будут представлять собой структуру базы знаний процесса формообразования фасонных винтовых поверхностей червячными фрезами.

Элементы матрицы, которые обозначены цифрой 1 указывают, что связь установлена, а обозначенные цифрой 0 указывают, что связь не установлена. Ячейки представлены в виде элементов трех цветов, содержание которых определяется степенью формализации функциональных связей (зеленый – полная формализация, желтый – формализация не полная, красный – связь не выявлена).

Анализ полученного результата позволяет утверждать, что процесс изучен недостаточно, требует дальнейшего исследования.

На основе изучения неформализованных связей были выбраны основные направления исследований.

На рис. 1 приведены матрицы связей между параметрами конструкций и показателями работоспособности.

На рис. 2 приведены матрицы связей между параметрами конструкции и параметрами эксплуатации.

	Прочность	Твердость	Теплостойкость	Выборочность	Стружкообразование	Стойкость инструмента	Производительность
Внешний диаметр	1	0	0	0	0	0	0
Длина инструмента	0	0	0	1	0	0	0
Число заходов	0	0	0	0	0	0	1
Глубина струж. канавки	1	0	0	0	1	0	1
Число зубьев фрезы	1	0	0	0	0	0	0
Инструмент. Материал	1	1	1	0	0	1	1
Диам. посад. отверстия	0	0	0	1	0	0	0
Высота профиля зуба	0	0	0	0	0	0	0
Форма профиля зуба	0	0	0	0	0	1	0
Форма струж. канавки	1	0	0	0	0	0	0
Угол винт. струж. канавки	0	0	0	1	0	0	0
Диам. начальн. цилиндра	0	0	0	0	0	0	0
Передний угол	0	0	0	0	0	1	1
Задний угол	1	0	0	0	0	1	0

Рис. 1. Матрицы связей между параметрами конструкций и показателями работоспособности

	Глубина резания	Подача	Скорость резания	Обр-й материал	СОЖ	Жест-ть крепления	Кол-во переточек	Сила резания	Рабн. загр. реж. кр.
Внешний диаметр	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Длина инструмента	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Число заходов	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Глубина струж. канавки	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Число зубьев фрезы	1	1	0	0	0	0	1	0	0
Инструмент. Материал	1	0	1	1	1	0	0	0	0
Диам. посад. отверстия	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Высота профиля зуба	1	0	0	0	0	0	0	1	0
Форма профиля зуба	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Форма струж. канавки	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Угол винт. струж. канавки	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Диам. начальн. цилиндра	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Передний угол	1	0	1	1	1	0	0	0	0
Задний угол	0	0	0	1	1	0	0	1	0

Рис. 2. Матрицы связей между параметрами конструкции и параметрами эксплуатации

Вторая глава диссертации посвящена решению прямой задачи профилирования червячных фрез для обработки винтовых фасонных поверхностей. Для решения прямой задачи профилирования необходимо формализовать процесс определения координат точек исходной поверхности в системе координат, связанной с производящей поверхностью инструмента, с учетом движений, которые совершают инструмент и деталь. Это требует последовательного перехода от системы координат обрабатываемой детали к системе координат инструмента.

С точки зрения алгоритмизации и реализации модели в виде программы, решающей задачу профилирования, в основе этих преобразований наиболее удобно применять матричный метод преобразований систем координат. Для реализации этого подхода необходимо сформировать подпрограмму получения матриц преобразования, предполагающих заданное преобразование системы координат.

В основе такой подпрограммы достаточно использовать одну исходную MO , которая имеет вид (1).

$$MO = \begin{pmatrix} \cos(xy) \cdot \cos(zx) & \sin(-xy) & \sin(zx) & Ax \\ \sin(xy) & \cos(yz) \cdot \cos(xy) & \sin(-yz) & Ay \\ \sin(-zx) & \sin(yz) & \cos(zx) \cdot \cos(yz) & Az \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

где xy, yz, zx – углы поворота вокруг осей Z, X, Y ;
 Ax, Ay, Az – перемещения по осям X, Y, Z .

Алгоритм подпрограммы MO , формирующей матрицу преобразования представлен на рисунке 3.

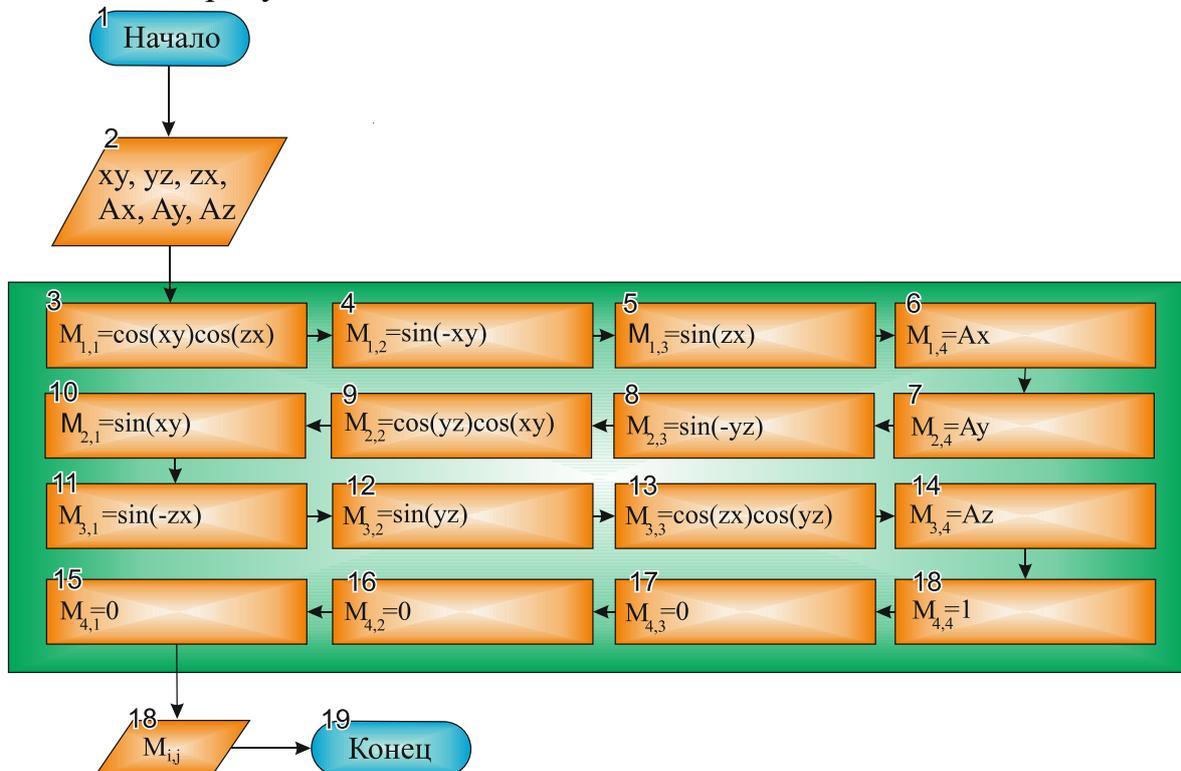


Рис. 3. Блок схема подпрограммы MO , которая формирует матрицы преобразования

Для решения прямой задачи профилирования червячных фрез для обработки фасонных винтовых поверхностей была разработана графическая схема метода, основанная на кинематике процесса формообразования, при котором начальный цилиндр детали катится без проскальзывания по начальному цилиндру инструмента. При этом их оси находятся под углом скрещивания (рис. 4).

Основное содержание схемы заключается в том, что винтовую поверхность детали, образованную направляющими в виде винтовых линий 1-1', 2-2', ..., S-S', ..., 5-5' катят без проскальзывания по прямой L-L, которая принадлежит начальному цилиндру инструмента. Система координат $X_3Y_3Z_3$ совершает винтовое движение вдоль оси инструмента, при этом направляющие проецируются на координатную плоскость X_3Z_3 в каждом дискретном положении. Совокупность проекций на плоскость образуют семейство, огибающая которых и формирует профиль инструмента.

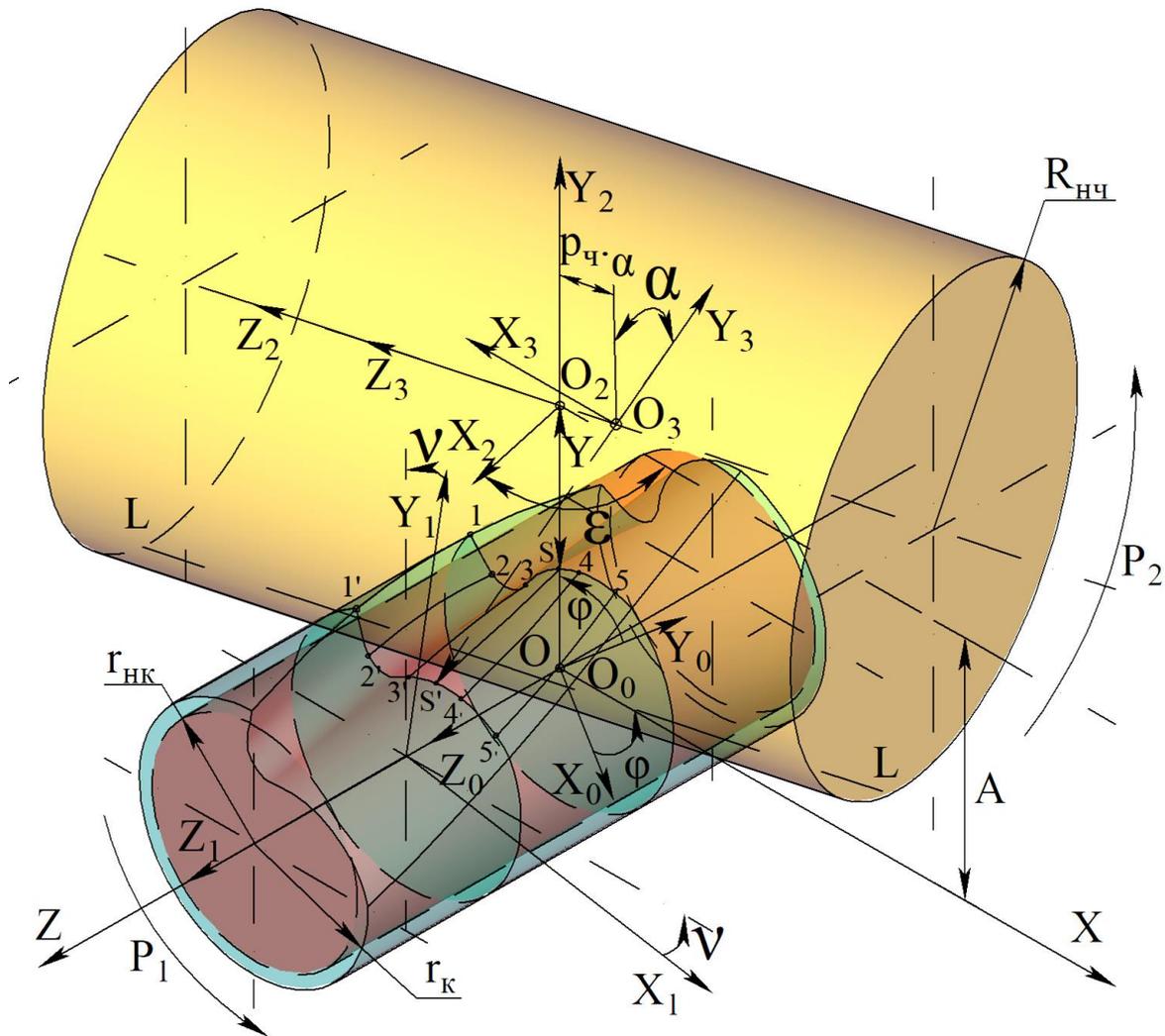


Рис. 4. Схема профилирования червячной фрезы для обработки детали с винтовой канавкой произвольного профиля

На рис. 5 показана блок-схема алгоритма формирования численной модели метода профилирования (подпрограмма MR), а также ниже представлены

необходимые исходные данные для формирования численной модели и сама численная модель (табл. 1).

В результате перечисленных действий образуется множество кривых, которые представляют собой проекции линий 1-1', 2-2', ..., S-S', ..., 7-7' на плоскость P_1 , совершающей винтовое движение вокруг оси Z_3 с винтовым параметром p_4 .

Поиск профиля червячной фрезы, как огибающей этого множества кривых, был реализован в виде алгоритма, который производит поиск точек с наивысшей ординатой для каждого значения абсциссы (в заданном интервале) с заданным шагом и допуском. В случае необходимости найденные точки возможно аппроксимировать или интерполировать степенным полиномом или сплайном, что позволит получить непрерывный контур профиля фрезы в осевом сечении в виде математической зависимости.

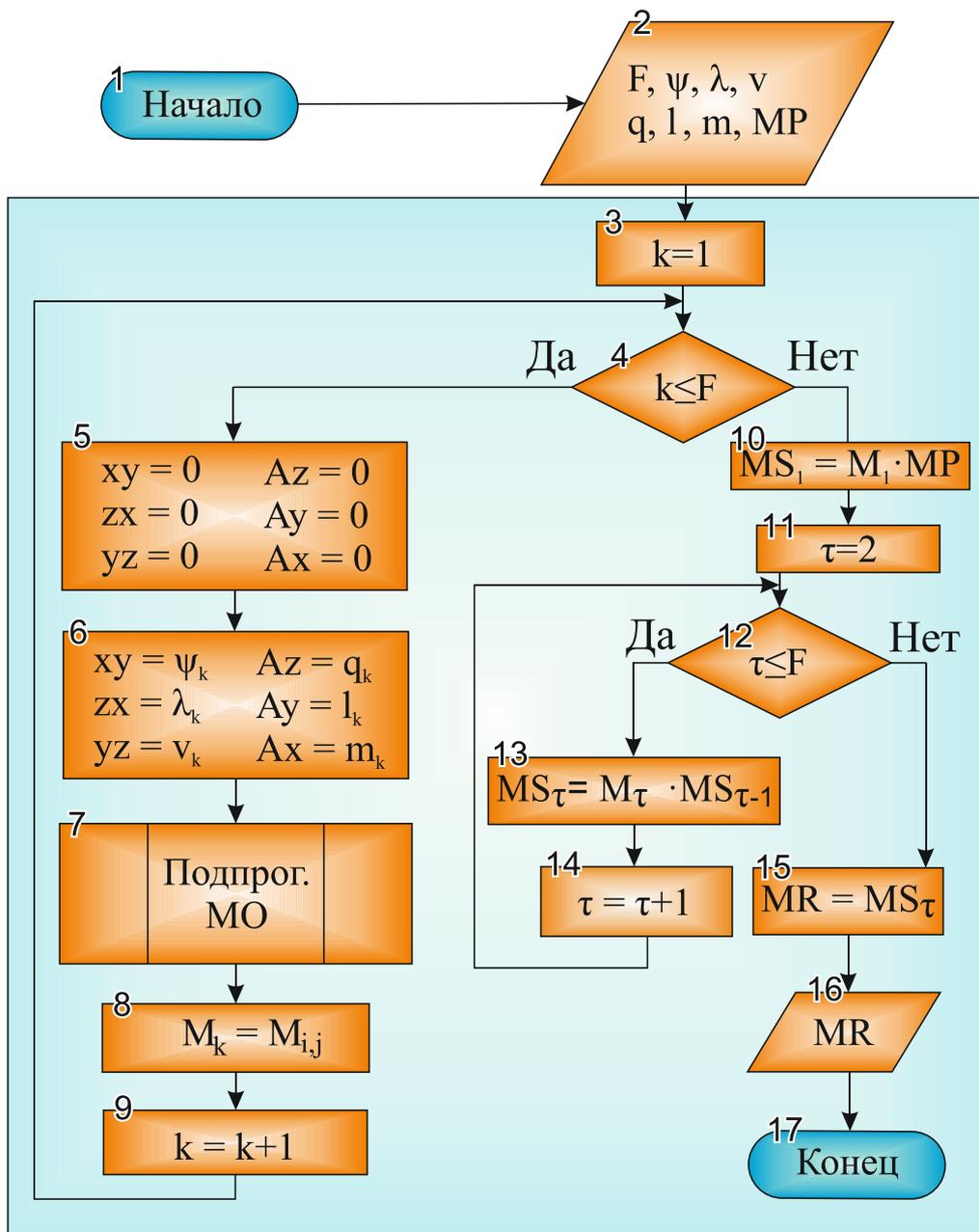


Рис. 5. Укрупненная блок схема программы, которая формирует общую численную модель (подпрограмма MR)

Исходные данные модели формообразования

Кол-во преобр.	Номер преобразования	Параметры преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (то 1 до F)		
4	1	$(\psi_1 = \varphi, \lambda_1 = 0, v_1 = 0)$	$(m_1 = r_{нк} \cdot \varphi, l_1 = 0, q_1 = 0)$
	2	$(\psi_2 = v + \Delta v, \lambda_2 = 0, v_2 = 0)$	$(m_2 = 0, l_2 = 0, q_2 = p_k \cdot v)$
	3	$(\psi_3 = 0, \lambda_3 = \varepsilon, v_3 = 0)$	$(m_3 = 0, l_3 = -A_y, q_3 = 0)$
	4	$(\psi_4 = \alpha, \lambda_4 = 0, v_4 = 0)$	$(m_4 = 0, l_4 = 0, q_4 = p_q \cdot \alpha)$

Результирующая матрица

$$MR = \begin{pmatrix} x_{3i} \\ y_{3i} \\ z_{3i} \\ 1 \end{pmatrix} = M\Sigma \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ где } M\Sigma = M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1.$$

Матрицы последовательного преобразования систем координат

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & -r_{нк} \cdot \varphi \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M2 = \begin{pmatrix} \cos(v + \Delta v) & \sin(v + \Delta v) & 0 & 0 \\ -\sin(v + \Delta v) & \cos(v + \Delta v) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_k \cdot v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$r_{нк}$ – радиус начального цилиндра обрабатываемой детали, φ – дискретный угол согласованного поворота

$$p_k = \frac{r_k}{\tan(\omega)} \Delta v = \frac{p_q \cdot \alpha}{r_{нк}}$$

r_k – наружный радиус детали, ω – угол наклона винтовой канавки детали

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -(r_{нк} + R_{кч}) \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M4 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_q \cdot \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

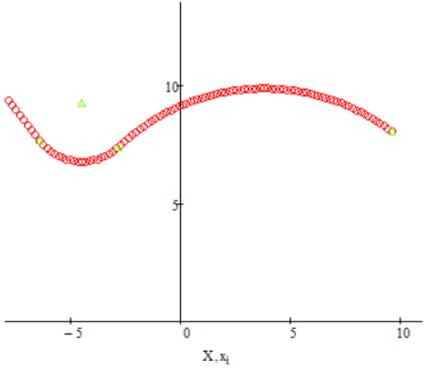
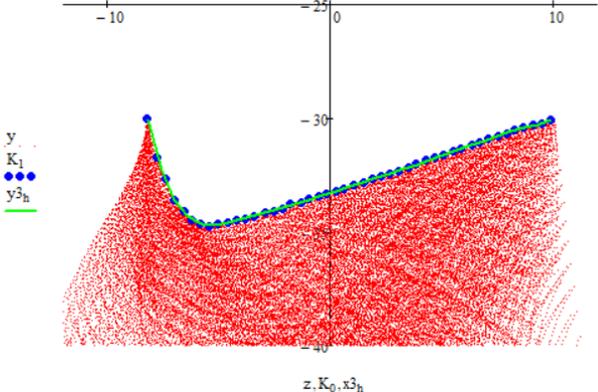
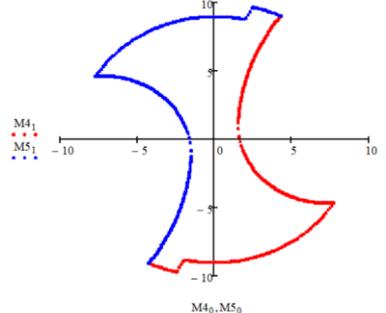
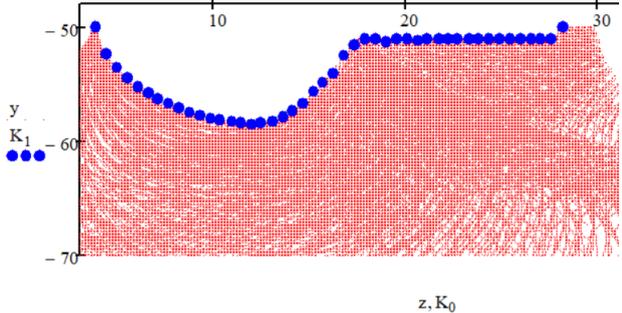
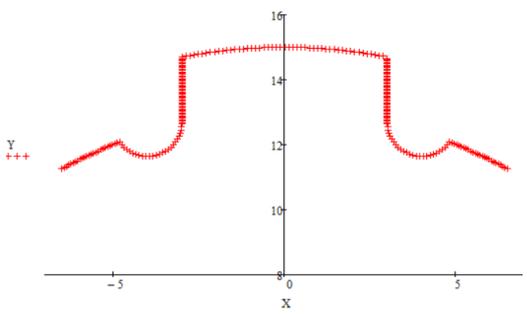
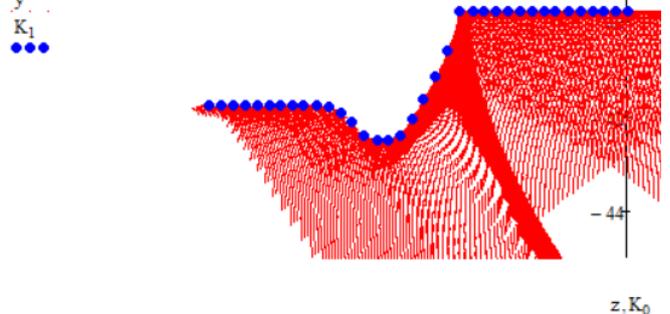
ε – угол скрещивания, $(r_{нк} + R_{кч})$ – межосевое расстояние, сумма радиусов начальных цилиндров

$$\tan(\alpha) = \frac{x_{2s'}}{y_{2s'}}$$

p_q – винтовой параметр червяка

Для формирования исходного профиля были разработаны параметрические математические модели различных поверхностей: винтовых стружечных канавок концевых фрез и сверл, шлицевого вала, звездочки, эвольвентного зубчатого колеса. В рамках этих моделей поверхность задается основными размерными параметрами детали, а результат формируется в виде точек профиля в торцевом сечении. Эти модели были использованы, как модули исходных данных в общей модели формообразования. В таблице 2 приведены результаты моделирования различных поверхностей, а также приведены результаты профилирования червячных фрез для обработки винтовых стружечных канавок концевой фрезы и сверла, шлицевого вала.

Исходные данные и результаты профилирования червячных фрез

<p>Параметры концевой фрезы</p> <p>$D = 25$ мм, $d_s = 15$ мм, $\rho = 2.5$ мм, $z = 4$, $f = 0$ мм, $\alpha_1 = 15^\circ$, $\gamma = 0^\circ$, $\omega = 20^\circ$</p>	<p>Параметры обработки</p> <p>$rn = 12.5$ мм, $Rn = 30$ мм, $\varepsilon = 71.5^\circ$, $g = 1$</p>
<p>Профиль концевой фрезы в торцевом сечении</p>	<p>Профиль фрезы в осевом сечении</p>
	
<p>Параметры сверла</p> <p>$D = 20$ мм, $\psi = 95^\circ$, $\varphi = 60$, $f = 2$ мм, $h = 0.5$ мм, $\omega = 30^\circ$</p>	<p>Параметры обработки</p> <p>$rn = 10$ мм, $Rn = 50$ мм, $\varepsilon = 62^\circ$, $g = 1$</p>
<p>Профиль сверла в торцевом сечении</p>	<p>Профиль фрезы в осевом сечении</p>
	
<p>Параметры шлицевого вала</p> <p>$D = 30$ мм, $d = 26$ мм, $z = 6$, $B = 6$ мм</p>	<p>Параметры обработки</p> <p>$rn = 14.776$ мм, $Rn = 40$ мм, $\varepsilon = 93^\circ$, $g = 1$</p>
<p>Профиль шлицевого вала</p>	<p>Профиль фрезы в осевом сечении</p>
	

Полученные результаты показывают возможности модульной модели решать прямую задачу профилирования червячных фрез для обработки различных деталей с периодическими фасонными, и в том числе винтовыми, поверхностями.

Описанный выше метод профилирования был реализован в виде трехмерной параметрической модели в среде T-flex CAD 3D (рис. 6). Модель демонстрирует широкие возможности применения современных CAD-систем и трехмерной графики в решении сложных задач формообразования.

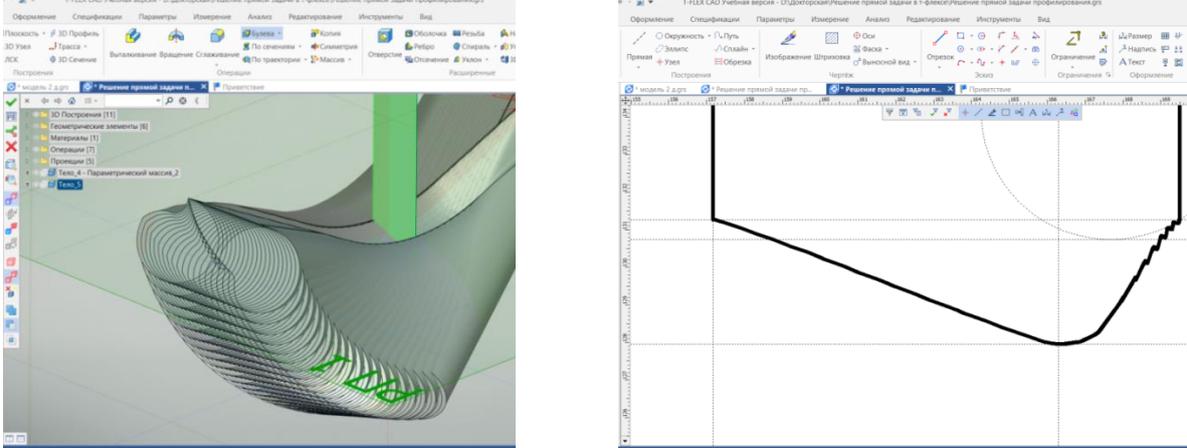


Рис. 6. Реализация метода профилирования червячных фрез в среде T-flex CAD 3D

Решение обратной задачи профилирования выполняется по тому же алгоритму (см. рис. 5), что и прямая задача, однако он требует формирования своей численной модели на основе исходных данных (табл. 3).

Была разработана графическая схема решения обратной задачи профилирования, которая основана на кинематике процесса формообразования (рис. 7).

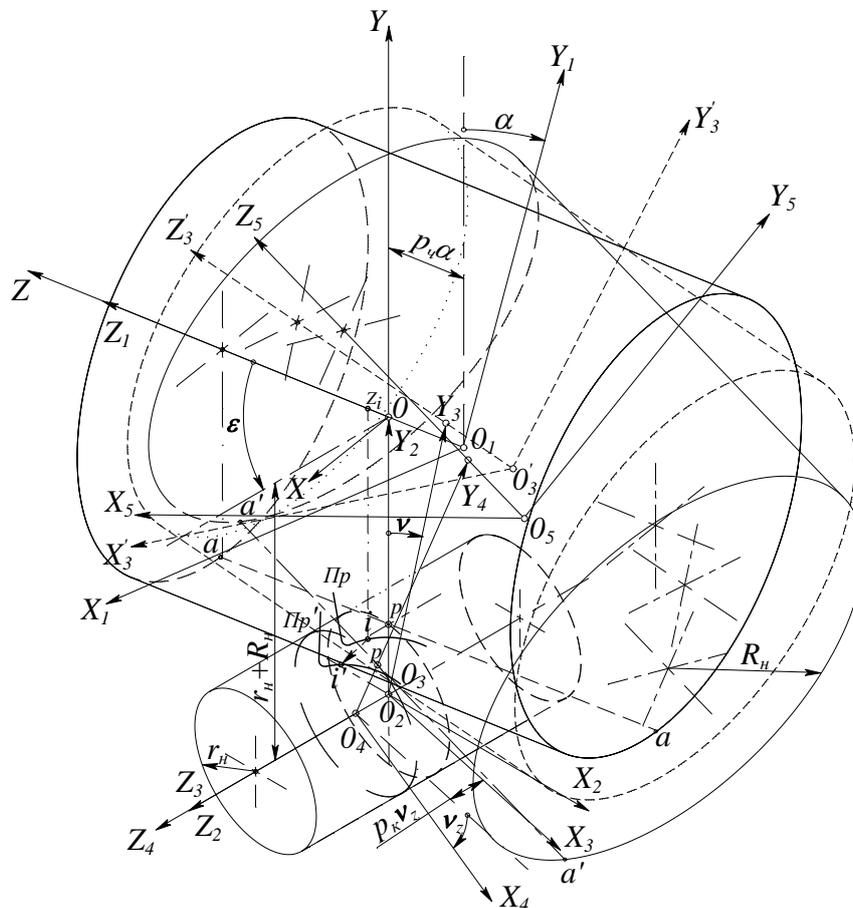


Рис. 7. Схема модели обратной задачи профилирования червячной фрезы при обработке винтовой поверхности детали

Исходные данные модели формообразования

Кол-во преобр.	Номер преобразования	Параметры преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (то 1 до F)		
4	1	$(\psi_1 = \alpha, \lambda_1 = 0, v_1 = 0)$	$(m_1 = 0, l_1 = 0, q_1 = p_c \cdot \alpha)$
	2	$(\psi_2 = 0, \lambda_2 = \varepsilon, v_2 = 0)$	$(m_2 = 0, l_2 = A_y, q_2 = 0)$
	3	$(\psi_3 = v + \Delta v, \lambda_3 = 0, v_3 = 0)$	$(m_3 = 0, l_3 = 0, q_3 = p_k \cdot v)$
	4	$(\psi_4 = \varphi, \lambda_4 = 0, v_4 = 0)$	$(m_4 = r_{нк} \cdot \varphi, l_4 = 0, q_4 = 0)$

Матрицы последовательного преобразования систем координат

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & P_c \cdot \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

α – угол поворота вокруг оси Z, P_c – винтовой параметр производящей поверхности червячной фрезы

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(v + \Delta v) & \sin(v + \Delta v) & 0 & 0 \\ -\sin(v + \Delta v) & \cos(v + \Delta v) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p_k \times v \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

r_k – наружный радиус детали, ω – угол наклона винтовой канавки

$$\text{детали } p_k = \frac{r_k}{\tan(\omega)} \quad \Delta v = \frac{p_c \cdot \alpha}{r_{нк}}$$

$$M2 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (r_{нк} + R_{нк}) \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ε – угол скрещивания, $(r_{нк} + R_{нк})$ – межосевое расстояние, сумма радиусов начальных цилиндров

$$M4 = \begin{pmatrix} \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) & 0 & r_{н} * \varphi \\ \sin(\varphi) & \cos(\varphi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$r_{н}$ – радиус начального цилиндра обрабатываемой дета, φ – согласованный поворот (обкатка) вокруг оси Z

Результирующая матрица

$$MR = M\Sigma \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \text{ где } M\Sigma = M4 \cdot M3 \cdot M2 \cdot M1.$$

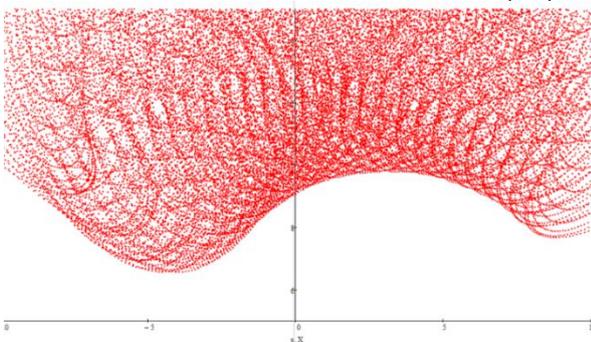


Рис. 8. Результат решения обратной задачи профилирования в среде Mathcad

На рис. 8 приведен результат решения обратной задачи профилирования при обработке винтовой стружечной канавки концевой фрезы специальной червячной фрезой. На основе описанного выше метода и схемы (рис. 7) был разработан метод определения схемы резания при формообразовании винтовой поверхности детали инструментом червячного типа, позволяющий определять размеры срезаемых слоев вдоль режущей кромки.

Также данный метод является отдельным самостоятельным методом решения обратной задачи профилирования. В таблице 4 приведены исходные данные модели формирования схемы резания.

Таблица 4

Исходные данные модели формообразования

Кол-во преоб.	Номер преобразования	Параметр преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (то 1 до F)		
4	1	$(\psi_1 = \alpha, \lambda_1 = 0, \nu_1 = 0)$	$(m_1 = 0, l_1 = 0, q_1 = p_c \cdot \alpha)$
	2	$(\psi_2 = 0, \lambda_2 = \varepsilon, \nu_2 = 0)$	$(m_2 = 0, l_2 = A_y, q_2 = 0)$
	3	$(\psi_3 = \nu, \lambda_3 = 0, \nu_3 = 0)$	$(m_3 = 0, l_3 = 0, q_3 = 0)$
	4	$(\psi_4 = \nu_z, \lambda_4 = 0, \nu_4 = 0)$	$(m_4 = 0, l_4 = 0, q_4 = l_s)$

Матрицы последовательного преобразования систем координат

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & p_c \cdot \alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

поворот профиля на угол α вокруг оси Z и согласованное перемещение на расстояние $p_c \alpha$;

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\nu) & -\sin(\nu) & 0 & 0 \\ \sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

поворот вокруг оси Z_2 на угол $\nu = \frac{\alpha n}{Z_k}$,

$$M2 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & (r_{нк} + R_{нк}) \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

ε – угол скрещивания, $(r_{нк} + R_{нк})$ – межосевое расстояние, сумма радиусов начальных цилиндров

$$M4 = \begin{pmatrix} \cos(\nu_z) & -\sin(\nu_z) & 0 & 0 \\ \sin(\nu_z) & \cos(\nu_z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

перемещение $l_s = \frac{S_z Z \alpha}{2\pi}$ по оси Z_2 ,

согласованный поворот на угол $\nu_z = \frac{l_s}{p_k}$

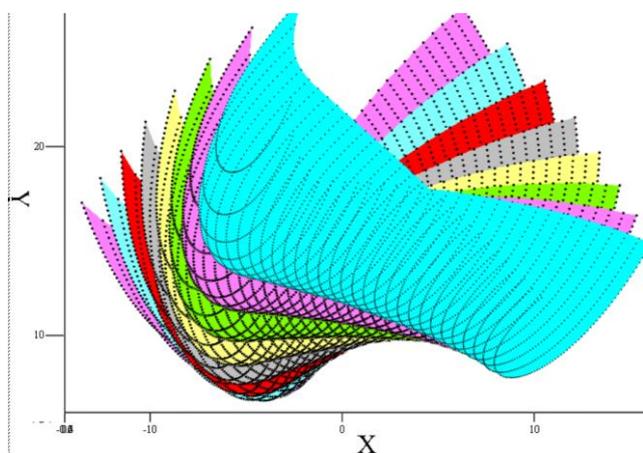


Рис. 9. Результат моделирования срезаемых слоев и схемы резания при обработке винтовой поверхности червячной фрезой

Результат моделирования схемы резания в среде Mathcad приведен на рис. 9. При исследовании и проектировании фасонных режущих инструментов, для обработки сложных, в том числе винтовых поверхностей деталей большое значение имеет определение кинематических задних углов вдоль режущей кромки. Разработанный метод формирования схемы резания позволяет определить толщину срезаемого слоя и изменения кинематических задних углов с обязательным учетом параметров установки, формообразующих движений, числа зубьев Z и подачи S_z .

Метод решения обратной задачи был реализован в виде трехмерной параметрической модели в среде T-flex CAD 3D (рис. 10).

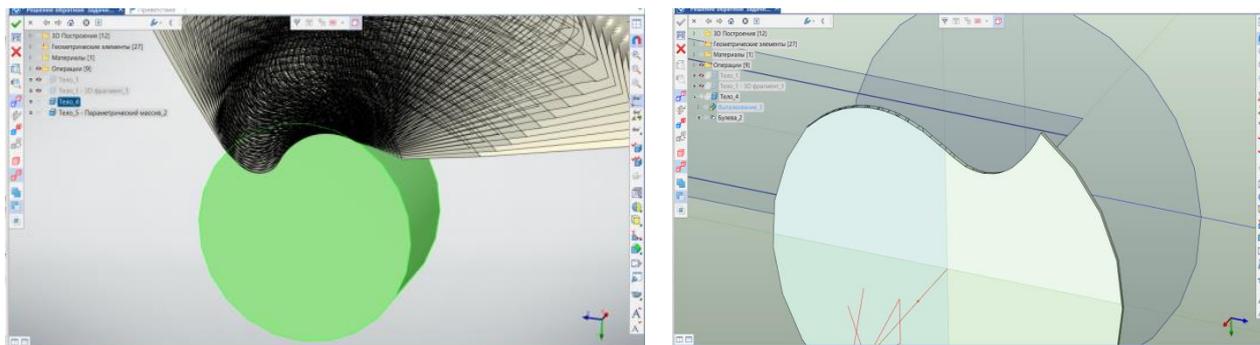


Рис. 10. Реализация метода профилирования червячных фрез в среде T-flex CAD 3D

На основе разработанного метода решения обратной задачи профилирования и метода определения схемы резания, была разработана параметрическая модель обработки поверхностей в среде T-flex CAD 3D. На рис. 11 и 12 показана визуализация процесса симуляции фрезерования винтовых канавок концевой фрезы и фрезерование шлицевого вала.

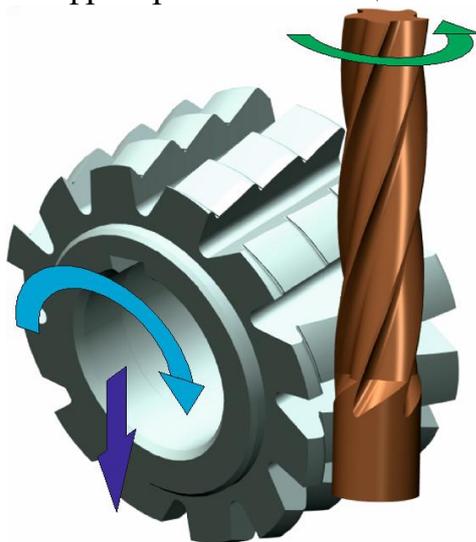


Рис. 11. Модель обработки стружечных канавок концевой фрезы

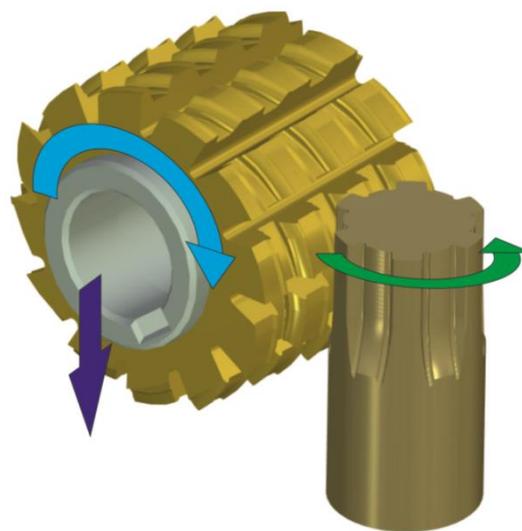


Рис. 12. Модель обработки шлицевого вала

Третья глава диссертации была посвящена решению обратной задачи профилирования, а также созданию математической модели обработки фасонных винтовых поверхностей инструментами стандартного профиля, как частного случая применения общего подхода к решению задач профилирования. В целях демонстрации спектра его возможностей.

На основе общей модели формообразования, в качестве частного случая, был разработан способ формообразования фасонных винтовых поверхностей инструментом прямого профиля. В исходном положении ось инструмента располагается вертикально и пересекает ось обрабатываемой детали под прямым углом, а торец инструмента совмещен с горизонтальной плоскостью, проходящей через ось заготовки.

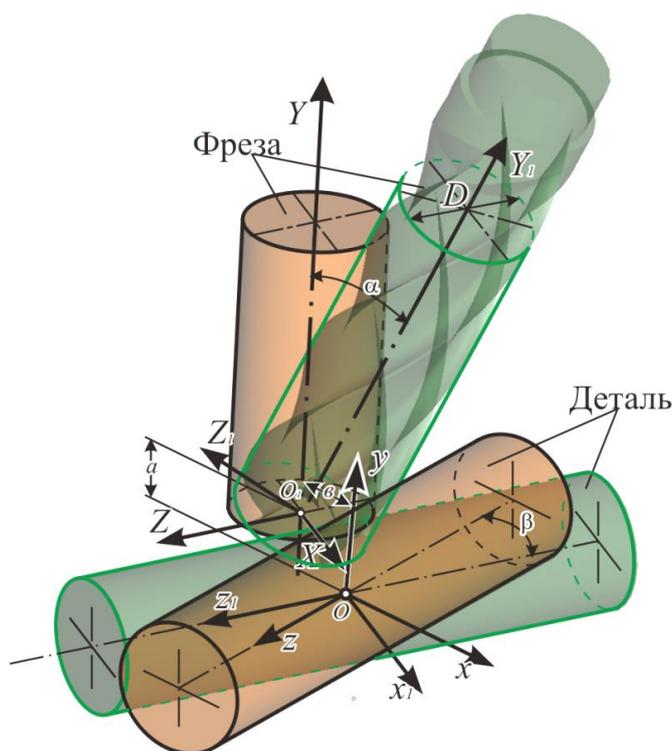


Рис. 13. Схема расположения фрезы при обработке винтовой поверхности

Перечисленные выше параметры необходимы для установки инструмента прямого профиля относительно обрабатываемой детали. Однако в расчетных схемах определения профиля винтовой поверхности используются только три расчетных параметра: угол скрещивания – ε , межосевое расстояние – m , а также положение точки скрещивания l . Зависимости между расчетными параметрами установки ε , m , l и станочными параметрами a , b , α , β приведены ниже.

$$m = \left[\frac{b}{\cos(\beta)} - (a \operatorname{tg}(\alpha) - b \operatorname{tg}(\beta)) \sin(\beta) \right] \sqrt{1 + \sin(\beta) \operatorname{tg}^2(\alpha)}$$

$$l = \frac{1}{\sin(\alpha)} \left[a + \left\{ \frac{b}{\cos(\beta)} - (a \operatorname{tg}(\alpha) - b \operatorname{tg}(\beta)) \sin(\beta) \right\} \frac{\operatorname{tg}(\alpha) \sin(\beta)}{\operatorname{ctg}^2(\alpha) + \sin^2(\beta)} \right]$$

$$\cos(\varepsilon) = \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta)$$

Для решения обратной задачи профилирования был разработан численный метод определения координат профиля обрабатываемой винтовой поверхности детали по заданным станочным параметрам установки и размерам инструмента стандартного профиля.

При разработке метода решения обратной задачи были сформированы расчетная схема (рис. 14), методика, алгоритм и программа численного метода определения профиля винтовой поверхности по заданным параметрам установки.

Основное содержание расчетной схемы определения профиля данным численным методом заключается в том, что точкой, принадлежащей профилю торцевого сечения винтовой поверхности на заданном абсциссой x_i участке, является точка на профиле инструмента, которая при вращении ее вокруг оси

Установка инструмента на станке (рис. 13) заключается в перемещении его вдоль своей оси O_1Y на расстояние a , и в вертикальной плоскости перпендикулярно к собственной оси по OX на расстояние b , затем – повороте вокруг горизонтальной оси O_1X на угол α и в заключение – повороте заготовки вокруг вертикальной оси OY на угол β .

Станочные параметры установки a , b , α , β и диаметр D инструмента позволяют получать криволинейную поверхность, при этом профиль винтовой канавки получается как огибающая проекций прямолинейных режущих кромок инструмента на плоскость торцевого сечения.

инструмента будет иметь в подвижной системе координат XYZ , связанной с торцевым сечением, минимальную ординату y_i .

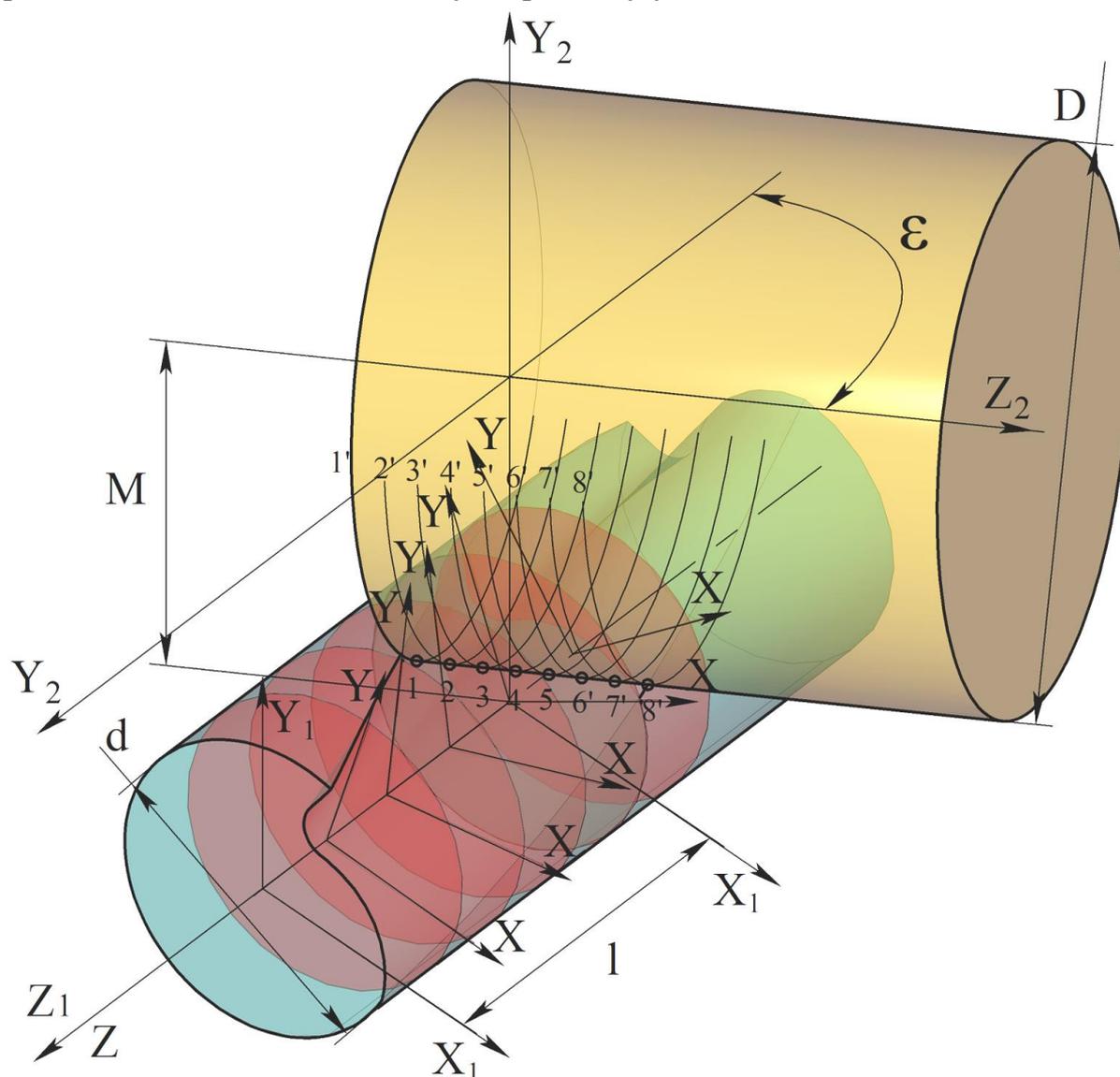


Рис.14. Расчетная схема численного метода определения профиля обрабатываемой винтовой поверхности инструментом прямого профиля в заданных сечениях

На рис. 15 представлена блок-схема алгоритма численного метода, а также ниже, в таблице 5, представлены необходимые исходные данные для формирования численной модели в подпрограмме MR (рис. 5) и сама численная модель (2).

По алгоритму, показанному на рис. 15, была разработана параметрическая математическая модель в среде Mathcad. В табл. 6 приведен ряд результатов моделирования, указаны станочные параметры установки (α , β , a , b) и диаметр D инструмента прямого профиля, а так же результаты моделирования в виде винтовых проекций круговых линий, которые формируются движением точек принадлежащих инструменту и найденные точки профиля обработанной поверхности.

Полученные результаты демонстрируют возможность обработки стандартными концевыми или торцевыми фрезами различных винтовых поверхностей с фасонными профилями в широком интервале форм и размеров.

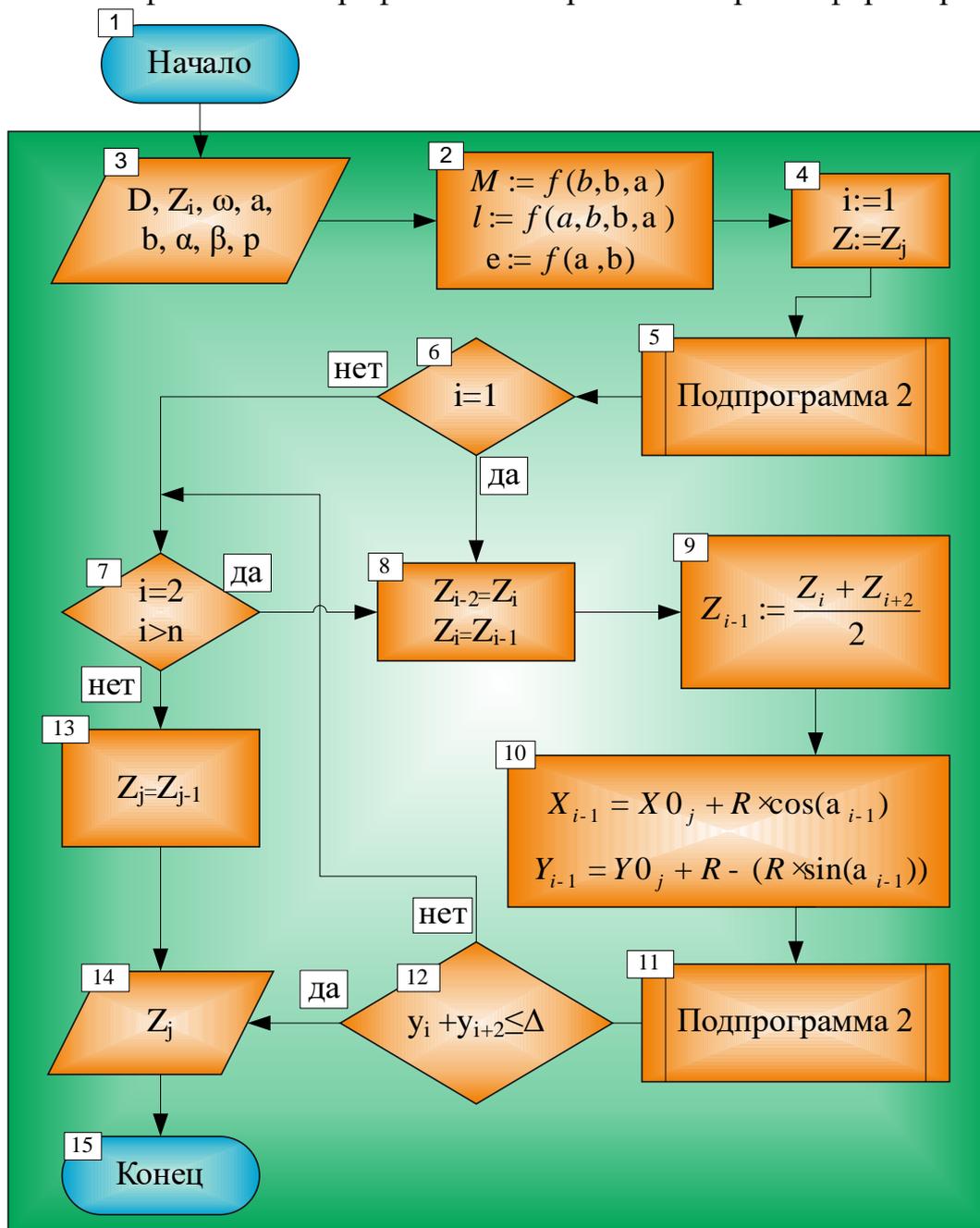


Рис. 15. Блок-схема алгоритма численного метода определения профиля винтовой поверхности в заданных сечениях

Таблица 5

Исходные данные для подпрограммы MR, формирующей численную модель.

Кол-во преобр.	Номер преобразования	Параметры преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (то 1 до F)		
3	1	$(\psi_1 = 1/p, \lambda_1 = 0, v_1 = 0)$	$(m_1 = r_{HK} \cdot \varphi, l_1 = 0, q_1 = 0)$
	2	$(\psi_2 = 0, \lambda_2 = -\varepsilon, v_2 = 0)$	$(m_2 = 0, l_2 = m, q_2 = 0)$
	3	$(\psi_4 = v, \lambda_4 = 0, v_4 = 0)$	$(m_4 = 0, l_4 = 0, q_4 = p \cdot v)$

Результирующая матрица

$$MR = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(M3 \times \left(M2 \times \left(M1 \times \begin{pmatrix} 0 \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{pmatrix} \right) \right) \right), \text{ где } Y_i = -R_i(2)$$

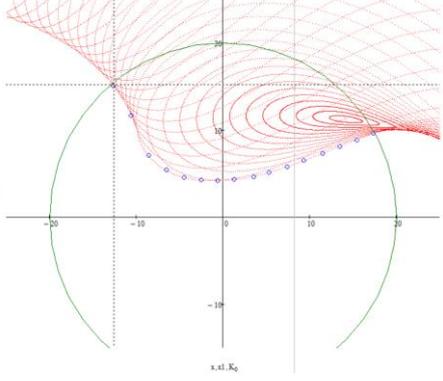
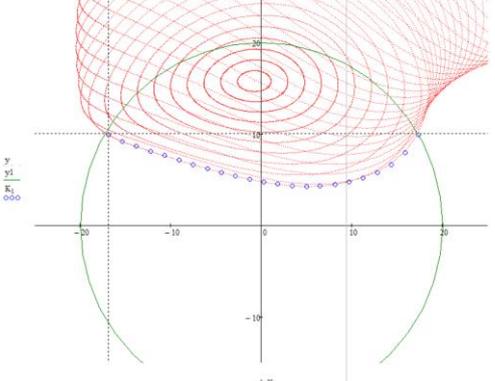
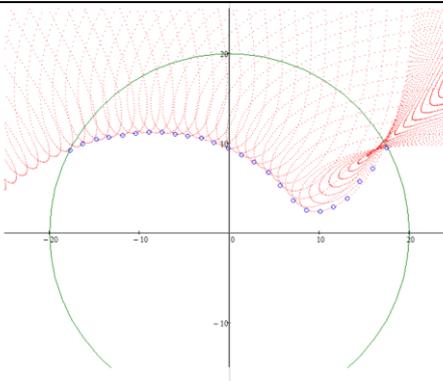
Матрицы последовательного преобразования систем координат

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M2 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & m \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p\nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \nu = \frac{Z_i}{p}; \quad p = \frac{t}{2\pi}, \text{ где } t - \text{ шаг винт. канавки}$$

Таблица 6

Результаты компьютерного моделирования обрабатываемой винтовой поверхности стандартным инструментом в среде Mathcad

		Результаты профилирования	Результаты профилирования	
Станочные параметры	a=20мм, b=25мм, α=-15°, β=12°, D=50мм		a=20мм, b=5мм, α=-10°, β=-40°, D=35мм	
	a=-12мм, b=35мм, α=-38°, β=28°, D=50мм			a=0мм, b=35мм, α=-30°, β=15°, D=50мм

Для обработки фасонных поверхностей важными факторами, которые позволяют оценить работоспособность инструмента, являются: оценка загруженности участков режущих кромок, величина изменения кинематических углов в процессе обработки, а также схема резания.

На рис.16 показана расчетная схема определения размеров срезаемого слоя при фрезеровании винтовой поверхности концевой фрезой прямого профиля.

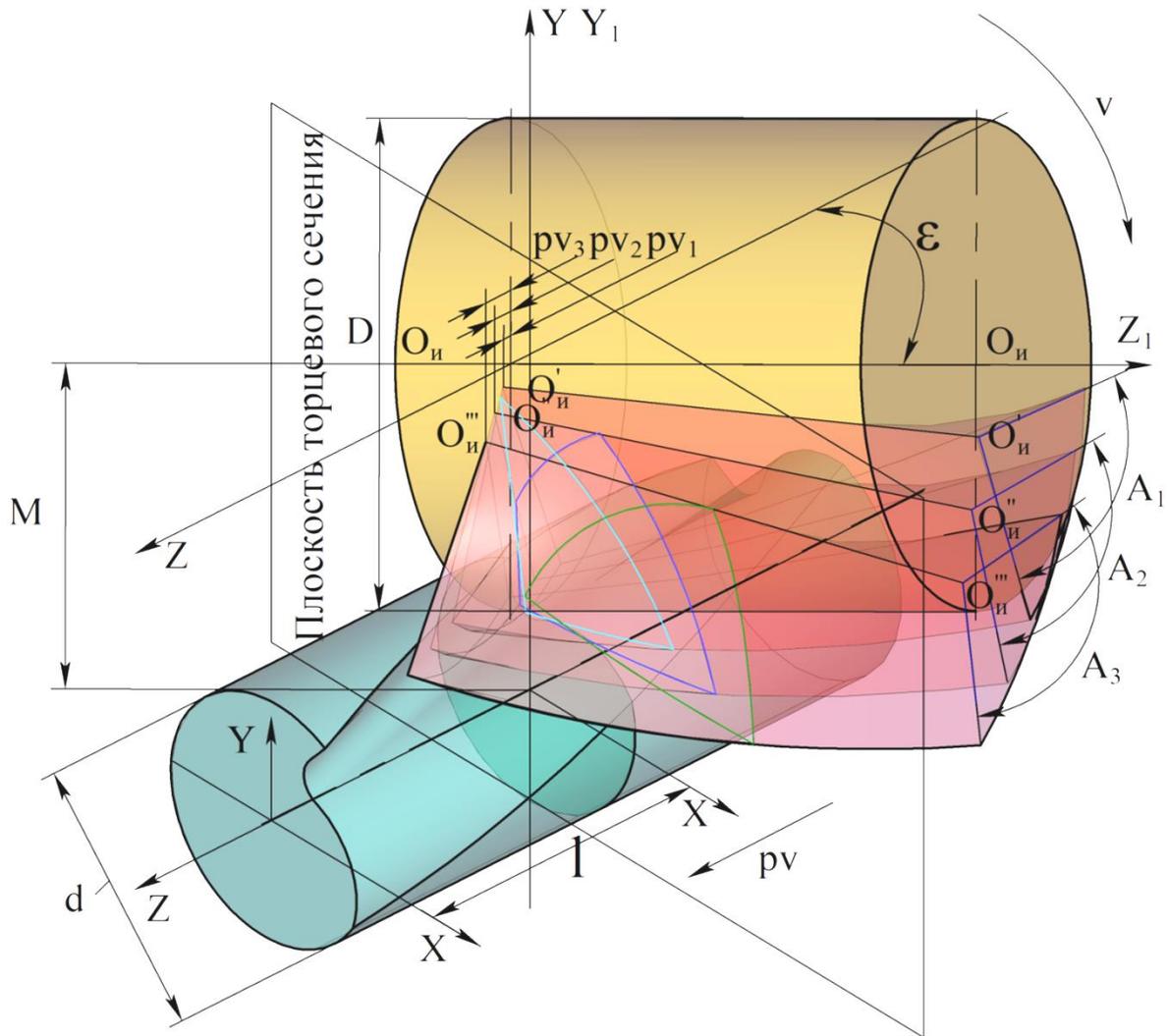


Рис. 16. Схема определения размеров срезаемого слоя при фрезеровании винтовой поверхности концевой фрезой прямого профиля

На базе расчетной схемы определения размеров срезаемых слоев была создана численная и компьютерная модель, позволяющая сформировать схему резания при формообразовании профиля винтовой канавки инструментом прямого профиля в зависимости от конструкции инструмента, параметров установки и режимов резания.

Схема резания представляет собой картину последовательного срезания слоев материала при формировании профиля винтовой поверхности детали (в торцевом сечении) режущими кромками зубьев фрезы в процессе обработки.

При формировании схемы резания торцевое сечение детали рассматривается неподвижным, а режущая кромка первого зуба инструмента поворачивается вокруг оси инструмента на один зуб, при этом одновременно ось фрезы совершает винтовое движение относительно оси обрабатываемой детали. На рис. 17 представлена блок-схема алгоритма метода построения схемы резания при формообразовании винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля.

В основе алгоритма лежит обращение к подпрограмме MR, которая формирует результирующую численную модель, исходные данные для подпрограммы MR представлены в таблице 7.

Таблица 7

Исходные данные для формирования численной модели построения схемы резания

Кол-во преобр.	Номер преобразования	Параметры преобразований систем координат	
		углы	перемещения
F	k (то 1 до F)		
4	1	$(\psi_4 = 0, \lambda_4 = 0, \nu_4 = \alpha)$	$(m_4 = 0, l_4 = 0, q_4 = 0)$
	2	$(\psi_1 = 1/p, \lambda_1 = 0, \nu_1 = 0)$	$(m_1 = 0, l_1 = 0, q_1 = 0)$
	3	$(\psi_2 = \nu, \lambda_2 = -\varepsilon, \nu_2 = 0)$	$(m_2 = 0, l_2 = m, q_2 = 0)$
	4	$(\psi_3 = \nu, \lambda_3 = 0, \nu_3 = 0)$	$(m_3 = 0, l_3 = 0, q_3 = p_k \cdot \nu)$

$$p = \frac{t}{2\pi}, \text{ где } t - \text{ шаг винтовой канавки.}$$

Результирующая матрица

$$MR = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \left(M_{4 \times 4} \left(M_{3 \times 3} \left(M_{2 \times 2} \left(M_{1 \times 1} \left(\begin{pmatrix} 0 \\ R \\ Z_{ui} \\ 1 \end{pmatrix} \right) \right) \right) \right) \right) \nu = \frac{s_z Z}{2\pi p} (\alpha_i - \alpha_{ai}).$$

Матрицы последовательного преобразования систем координат

$$M1 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M2 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & \sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & m \\ -\sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M3 = \begin{pmatrix} \cos(\nu) & \sin(\nu) & 0 & 0 \\ -\sin(\nu) & \cos(\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p\nu \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M4 = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon) & 0 & -\sin(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -m \\ \sin(\varepsilon) & 0 & \cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

В табл. 8 приведен ряд результатов моделирования схем резания в среде Mathcad в виде сформированных схем резания в зависимости от параметров установки (α, β, a, b) , диаметра D инструмента и подачи на зуб.

В ходе исследования схемы резания рассматривались две принципиальные схемы обработки фасонных винтовых канавок инструментов на базе цилиндрической и торцевой исходной инструментальной поверхности.

Первый вариант формирования винтовой поверхности реализуется при установке инструмента относительно заготовки таким образом, что цилиндрическая инструментальная поверхность обрабатывает спинку зуба, а вершина зубьев принимает участие в формировании передней поверхности.

Второй вариант реализуется при установке инструмента относительно заготовки таким образом, что спинку зуба формирует торцевая

инструментальная поверхность, а вершины зубьев участвуют в обработке только передней поверхности и дна канавки.

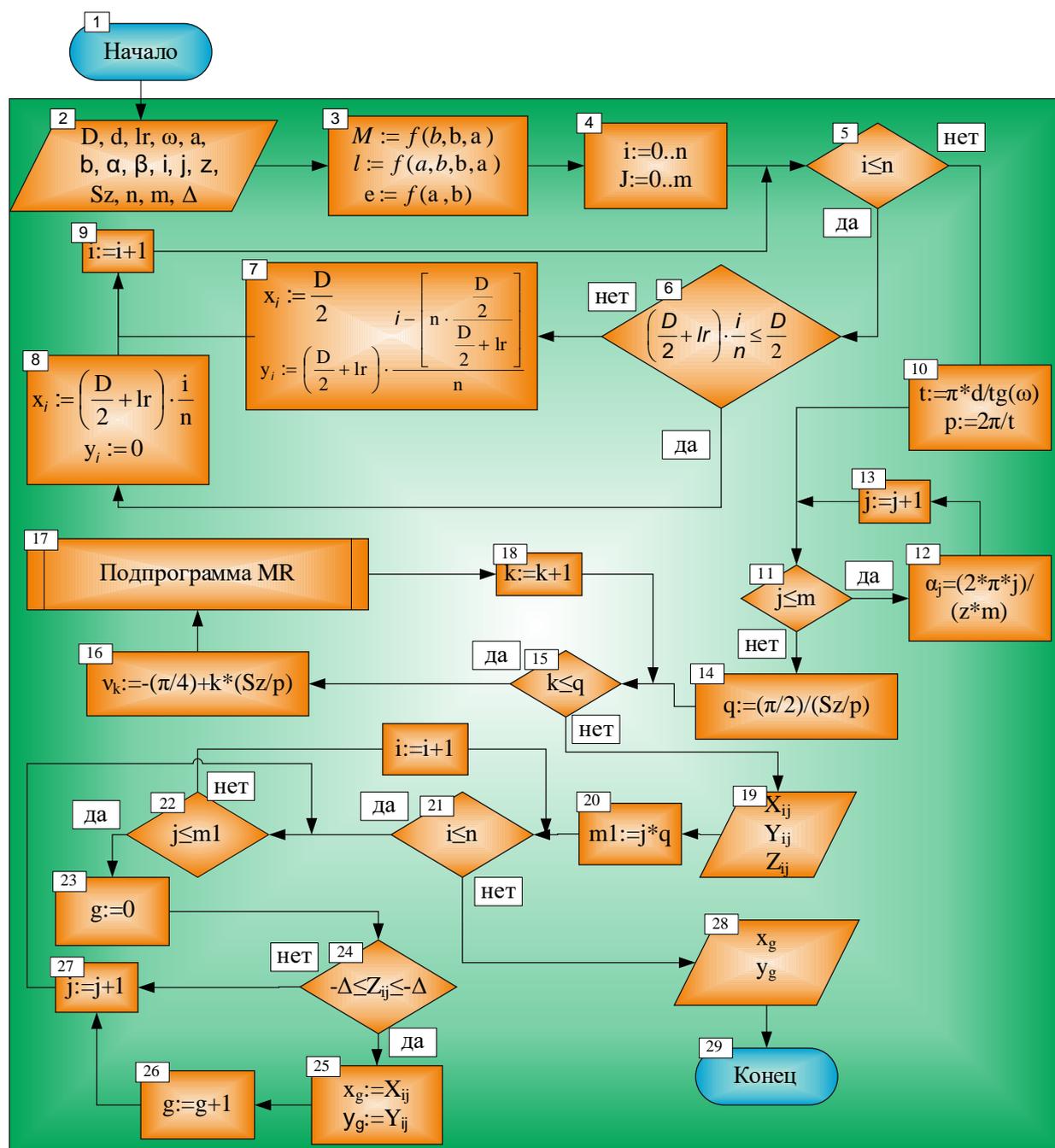
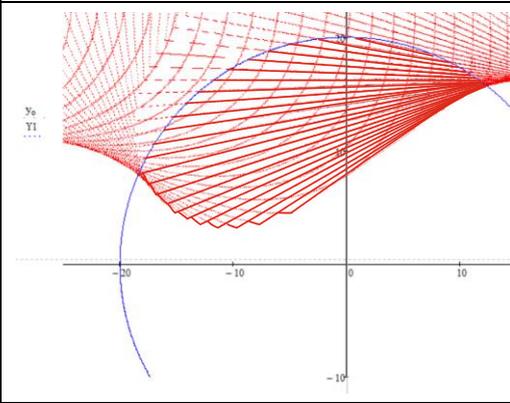
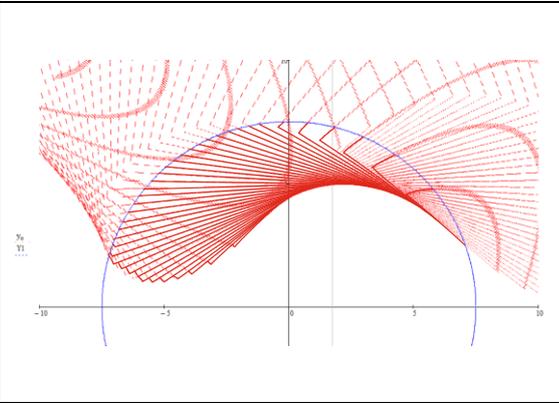
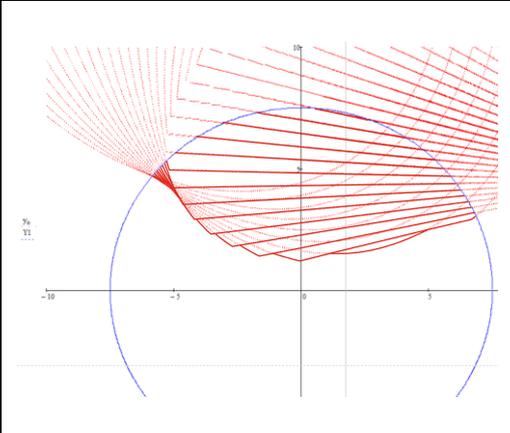
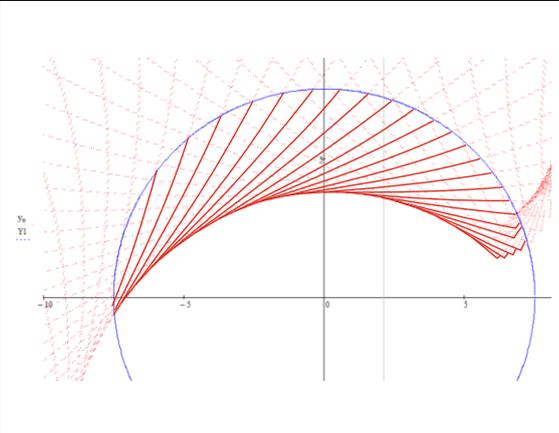


Рис. 17. Блок-схема метода построения схемы резания при формообразовании винтовых поверхностей инструментом прямого профиля

На рис. 18 видно, что для случая обработки концевой фрезой, на вогнутом участке профиля между точками 1-2 контур окончательно формируется вершинами зубьев концевой фрезы по генераторной схеме резания, что вызывает необходимость в увеличении радиуса скругления при вершине.

На участке между точками 2-3 профиль формируется режущими кромками на цилиндрической части концевой фрезы по генераторной схеме резания по методу огибания.

Результаты определения профиля обрабатываемой винтовой поверхности инструментом стандартного профиля выполненные в среде Mathcad

		Результаты моделирования		Результаты моделирования
Станочные параметры	$a=20\text{ мм}$, $b=5\text{ мм}$, $\alpha=-30^\circ$, $\beta=5^\circ$, $D=46\text{ мм}$, $Sz=1\text{ мм/зуб}$		$a=5\text{ мм}$, $b=3\text{ мм}$, $\alpha=-10^\circ$, $\beta=15^\circ$, $D=20\text{ мм}$, $Sz=0.5\text{ мм/зуб}$	
Станочные параметры	$a=13\text{ мм}$, $b=4\text{ мм}$, $\alpha=-50^\circ$, $\beta=-20^\circ$, $D=20\text{ мм}$, $Sz=0.5\text{ мм/зуб}$		$a=6\text{ мм}$, $b=19\text{ мм}$, $\alpha=-31^\circ$, $\beta=15^\circ$, $D=30\text{ мм}$, $Sz=0.8\text{ мм/зуб}$	

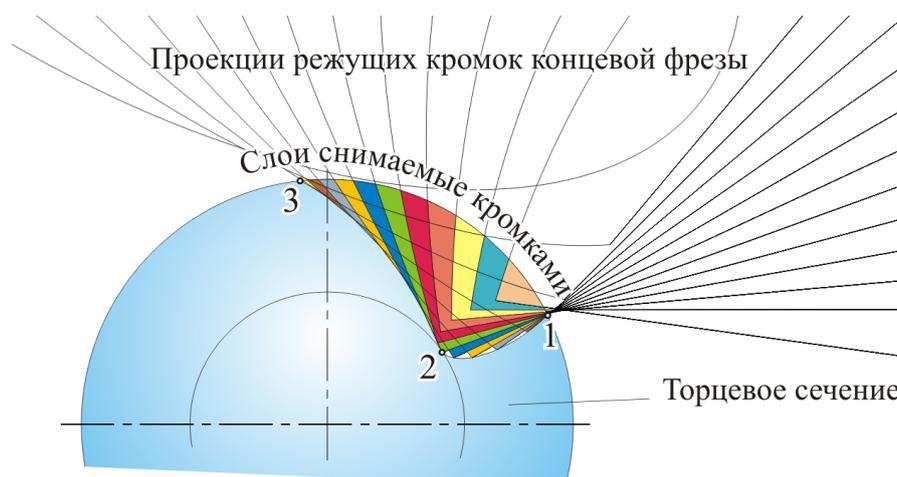


Рис. 18. Схема резания при фрезеровании винтовой канавки концевой фрезой концевой фрезой прямого профиля

Для второго случая (рис. 19) на вогнутом участке торцевого сечения между точками 1-2 профиль формируется режущими кромками по генераторной схеме резания, вершиной зубьев, при этом передняя поверхность зуба окончательно формируется цилиндрической частью инструмента, которая в данных сечениях

имеет форму эллипса, что позволяет сформировать переднюю поверхность с большим положительным передним углом по сравнению с первым случаем.

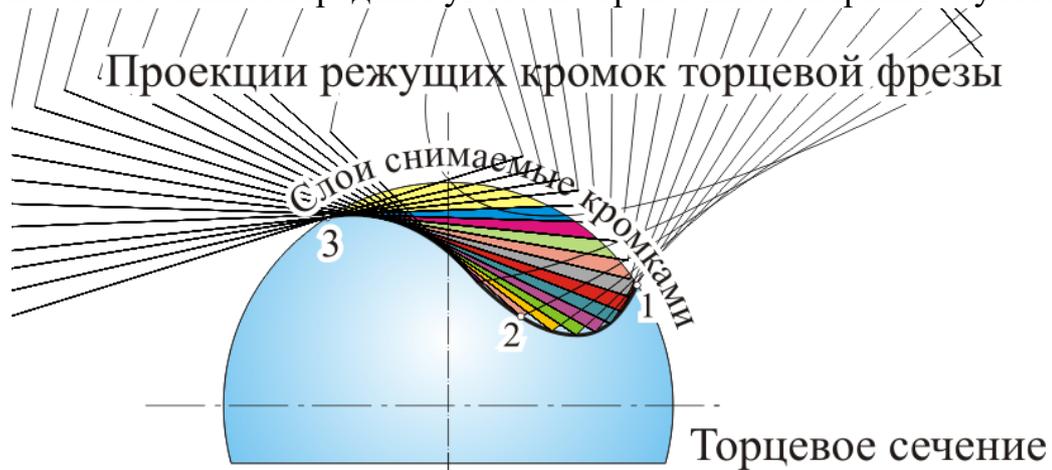


Рис.19. Схема резания при фрезеровании винтовой канавки концевой фрезой торцевой фрезой прямого профиля

На участке между точками 2-3 профиль торцевого сечения формируется режущими кромками торцевых зубьев по генераторной схеме резания по методу огибания.

Приведенная методика построения схемы резания может также рассматриваться как самостоятельный метод решения обратной задачи профилирования. Более того, данная методика позволяет оценить изменения кинематических задних углов по длине режущей кромки путем определения толщин срезаемого слоя на разных стадиях процесса формообразования.

Кинематический задний угол α_{ki} (рис. 20) вычисляется по формуле приведенной ниже, где Δ_i – толщина срезаемого слоя в i -й точке режущей кромки, Z – число зубьев фрезы, D – диаметр фрезы.

$$\varepsilon = \frac{\pi D}{Z}, \quad \alpha_{ki} = \alpha_i - \arctan\left(\frac{\Delta_i}{\varepsilon}\right) = \alpha_i - \arctan\left(\frac{\Delta_i Z}{\pi D}\right),$$

Для благоприятного протекания процесса обработки необходимо обеспечить условие, чтобы $\alpha_i > \alpha_{ki}$. Из рис. 20 видно, что толщина срезаемых слоев имеет непостоянный характер как на разных стадиях формообразования, так и по длине режущей кромки.

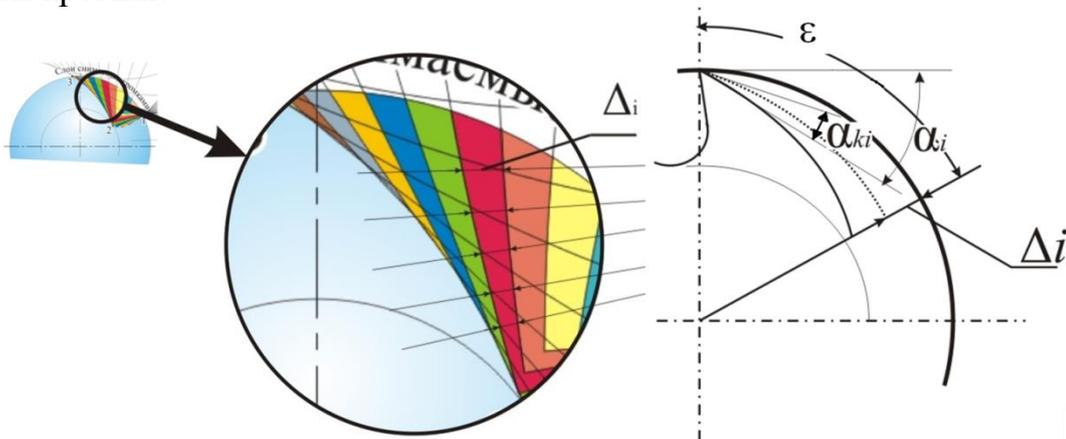


Рис. 20. Схема расчета кинематического заднего угла

Согласно схеме на рис. 16 ось инструмента перемещается вдоль оси детали на расстояние, равное величине подачи на зуб – S_z и согласованно поворачивается вокруг оси на угол $\nu = \frac{S_z}{p}$, где p – винтовой параметр, $p = \frac{t}{2\pi}$, t – шаг винтовой канавки.

Были проведены численные исследования изменения кинематических задних углов вдоль режущей кромки зуба фрезы на различных стадиях формообразования. Были рассмотрены два случая для обработки винтовой стружечной канавки концевой фрезой диаметром $D=25$ мм, числом зубьев $Z=4$, с шагом винтовой канавки $t=136$ мм. В первом случае (рис. 21) в качестве инструмента была использована концевая фреза $D_f=20$ мм, с числом зубьев $z=4$, с подачей на зуб $S_z=0.25$ мм, обработка проводилась на базе схемы с цилиндрической инструментальной поверхностью (рис. 18).

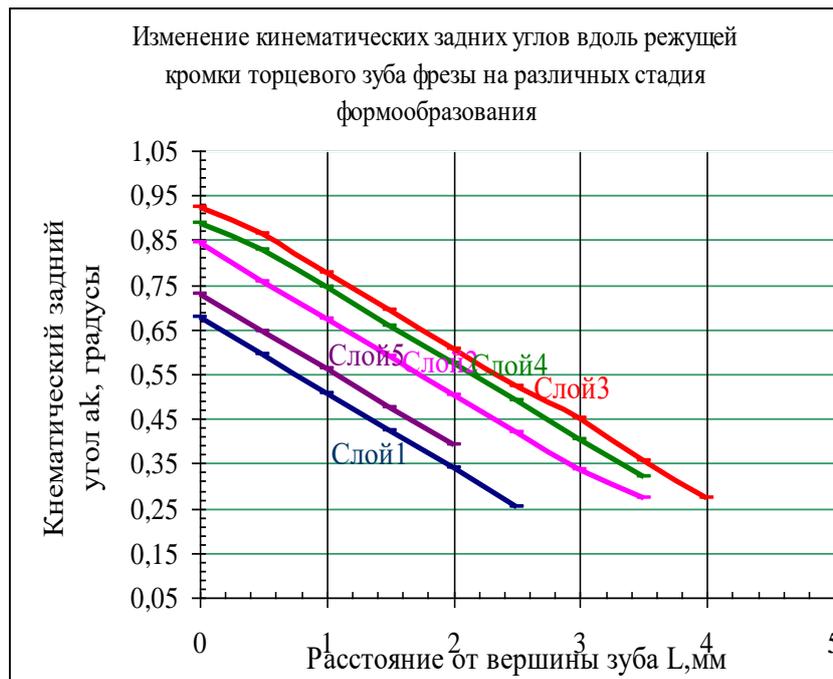


Рис. 21. Изменение кинематических задних углов при формообразовании винтовой стружечной канавки концевой фрезой концевой фрезой

Во втором случае (рис. 22) в качестве инструмента была использована торцевая фреза $D_f = 50$ мм, с числом зубьев $z = 8$, подачей на зуб $S_z = 0.15$ мм, обработка проводилась на базе схемы с торцевой инструментальной поверхностью (рис. 20).

Данные снимались с шагом 2 мм (с шагом угла поворота оси инструмента $\nu = 5.3^\circ$). Слои срезов на графиках пронумерованы в соответствии с порядком их появления в процессе формообразования.

Из графика на рис. 21 видно, что на цилиндрическом зубе на всех стадиях формообразования величина кинематического заднего угла и толщина срезаемого слоя линейно возрастают с ростом расстояния между точкой и вершиной зуба. При этом значения изменяются в относительно больших пределах (от 0.2° до 3.85°). На торцевом зубе кинематический задний угол и толщина срезаемого слоя с увеличением расстояния от вершины зуба линейно уменьшаются и стремятся к нулю. При этом величина кинематического угла изменяется в узком диапазоне (от 0.25° до 1°).

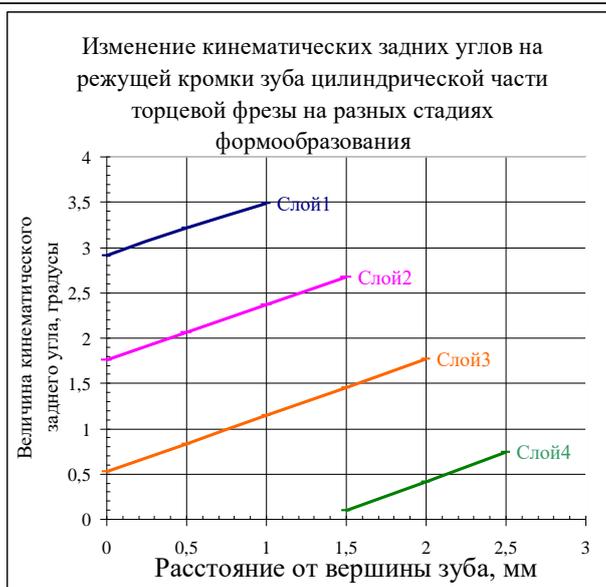
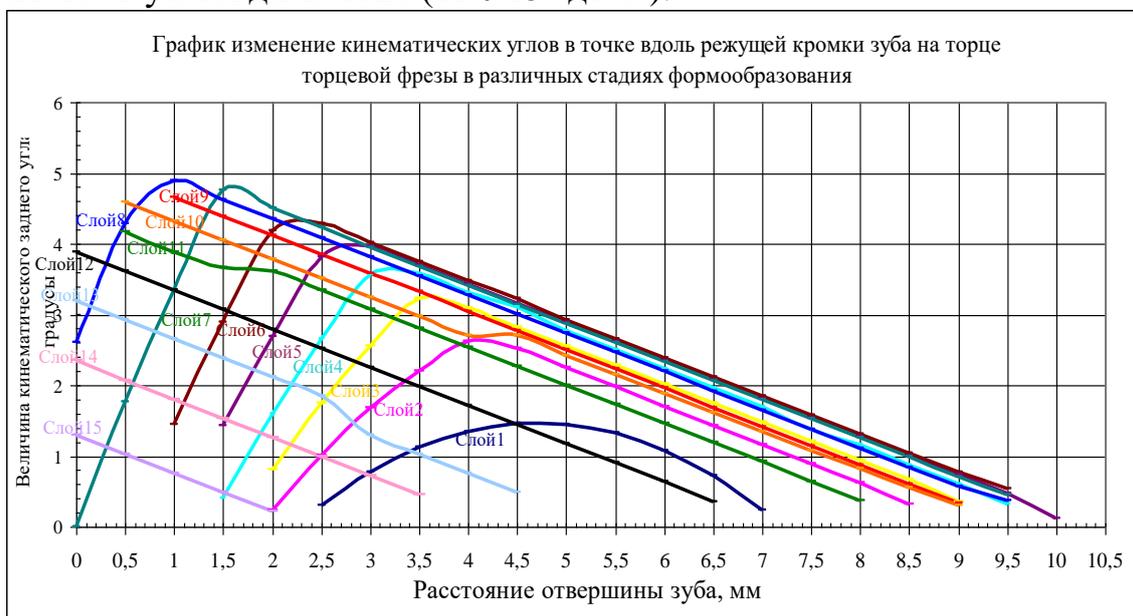


Рис. 22. Изменение кинематических задних углов при формообразовании винтовой стружечной канавки концевой фрезой торцевой фрезой

Из графика на рис. 22 видно, что при фрезеровании винтовой стружечной канавки концевой фрезой торцевой фрезой на режущей кромке торцевого зуба величина кинематического заднего угла и толщина срезаемого слоя непостоянная, значения изменяются неравномерно и в большом интервале (от 0° до 5°). При этом максимальные толщина срезаемого слоя и значения кинематических задних углов приходятся преимущественно на вершину зуба.

Фрезерование винтовых стружечных канавок концевой фрезой характеризуется более благоприятными условиями изменения кинематических задних углов и меньшей неравномерностью загрузки режущей кромки, чем фрезерование торцевой фрезой. Однако, проведенные исследования показали, что способ фрезерования торцевой фрезой позволяет получать более разнообразные формы профилей в более широком диапазоне размеров.

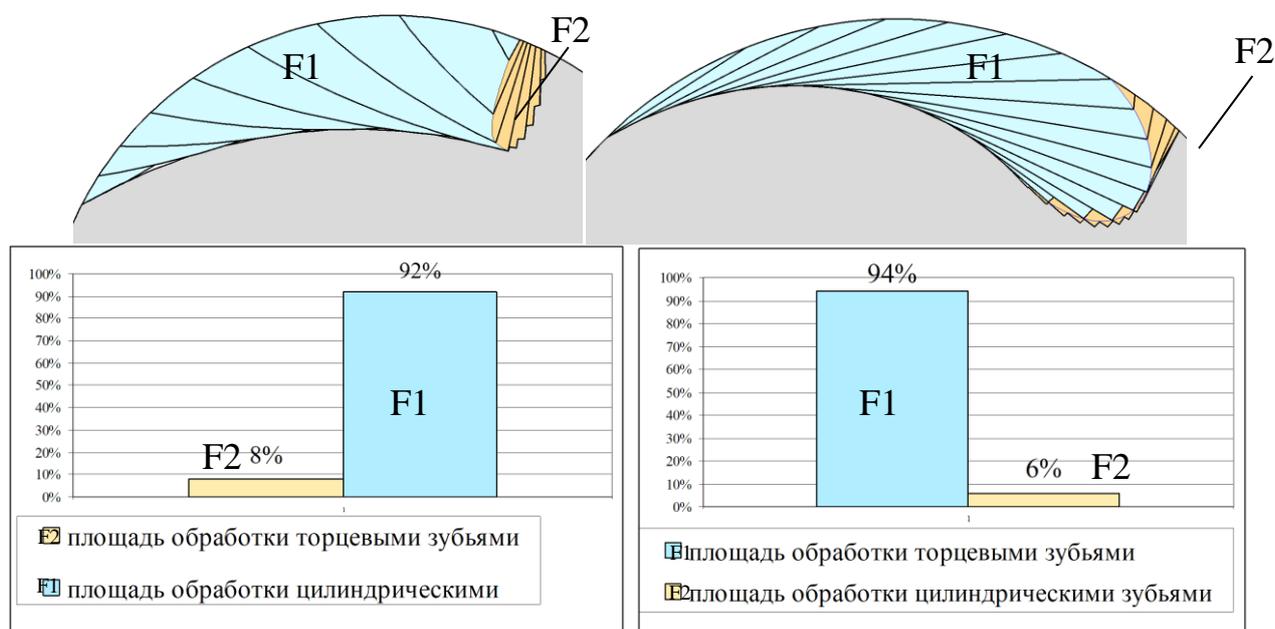


Рис. 23. Сравнение площади слоев, срезаемых режущими кромками при фрезеровании винтовой стружечной канавки концевой фрезой на базе цилиндрической и торцевой инструментальной поверхности

Анализ схемы резания позволил сравнить величины объема срезаемого материала режущими кромками на цилиндрической и торцевой поверхности фрезы при различных схемах обработки.

Четвертая глава диссертации посвящена экспериментальным исследованиям.

В качестве экспериментального подтверждения разработанного метода профилирования червячных фрез была решена задача, поставленная на предприятии ООО "ИНСТРУМЕНТ" (г. Подольск) по отработке технологии изготовления партии концевых фрез, в рамках которой операция обработки винтовых стружечных канавок выполняется по методу обкатки специальной червячной фрезой. Для отработки процесса формообразования винтовых канавок была выбрана концевая фреза: диаметр $D = 19$ мм, диаметр сердцевины $d = 11$ мм число зубьев $z = 5$, угол наклона винтовой канавки $\omega = 20^\circ$, передний угол $\gamma = -5^\circ$, угол спинки зуба $\alpha_1 = 30^\circ$ (рис. 24).

Была спроектирована специальная червячная фреза для обработки винтовых канавок концевых фрез. Фреза была изготовлена на заводе ПАО «МИЗ» (рис. 25).

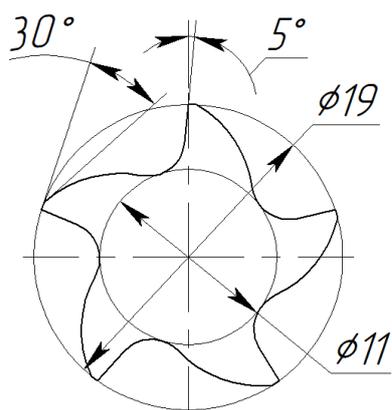


Рис. 24. Профиль фрезы в торцевом сечении

Для проведения эксперимента по обработке винтовых канавок были использованы заготовки из бронзы марки БрОЦС5-5-5 диаметром $19_{-0.1}$ мм. Обработка производилась на зубофрезерном станке PFAUTER RS00S на предприятии ООО "ИНСТРУМЕНТ" (г. Подольск) (рис. 26). Измерительная машина Walter Helicheck Pro+ позволяет производить контактный контроль профиля винтовых канавок инструментов с помощью щупа.



Рис. 25. Изготовленная специальная червячная фреза для обработки винтовых стружечных канавок концевых фрез



Рис. 26. Установка заготовки на станке PFAUTERRS00S и процесс обработки

Был произведен контроль профиля обработанных канавок в осевом сечении для сравнения полученного результата с исходным профилем.

Для оценки соответствия полученного профиля было построено поле допуска на профиль винтовой канавки инструмента (рис. 27) с учётом допусков на размеры профиля в соответствии с ГОСТ 17026-71 (Фрезы концевые. Конструкция и размеры) и ГОСТ 17024-82 (Фрезы концевые. Технические условия.) В табл. 9 приведены исходные размеры профиля, допуски, а также размеры, полученные в результате обработки.

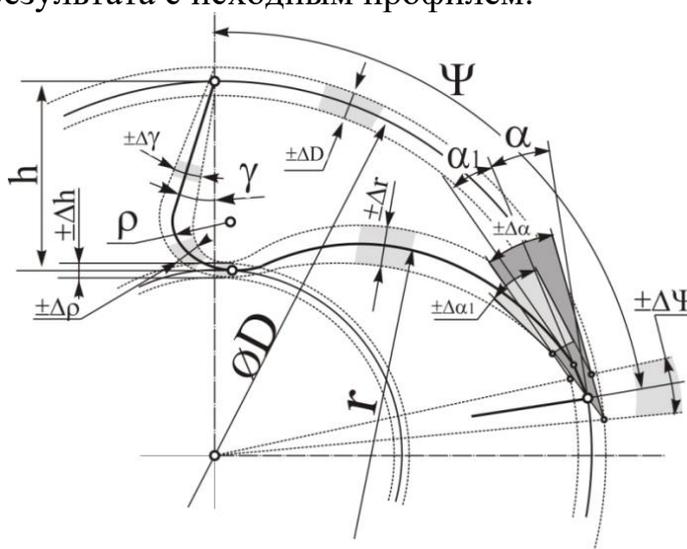


Рис. 27. Схема построения поля допуска на профиль винтовой стружечной канавки концевой фрезы

Контроль размеров полученного профиля

Параметры профиля винтовой канавки концевой фрезы	Допуск	Расчетные размеры и допуски Δ	Размеры полученного профиля
Внешний диаметр D	По js12	19 (+/-0.105) мм	Окончательно формируется при заточке по ленточке
Глубина канавки h	IT12/2	4 (+/-0.150) мм	4.1
Радиус спинки зуба r	IT12/2	18 (+/-0.180) мм	17.95
Радиус дна канавки ρ	IT12/2	2 (+/-0.1)	1.92
Передний угол γ	$\pm 1^\circ$	$-5^\circ \pm 1^\circ$	-4.9°
Задний угол α	$\pm 1^\circ$	$10 \pm 1^\circ$	Формируется на последующих операциях
Ширина ленточки f	IT12/2	1.5 (+/-0.1) мм	Формируется на последующих операциях
Окружной шаг ψ	$\pm 3^\circ$	$72^\circ \pm 3^\circ$	71.6°
Угол спинки зуба α_1	$\pm 2^\circ$	$30 \pm 2^\circ$	28.4°

Были проведены эксперименты с целью подтверждения адекватности математической модели формообразования фасонных винтовых канавок инструментов, а также определения условий формообразования за один проход фасонных винтовых поверхностей концевой и торцевой фрезами прямого профиля за счет параметров установки и размеров инструмента (рис. 28).

Эксперименты проводились на универсально-фрезерном станке модели 6P82 с поворотной шпиндельной головкой и делительной головкой для передачи согласованного винтового движения заготовки.

В качестве инструмента применялись:

- концевая фреза диаметром 20 мм по ГОСТ 20533-75 из быстрорежущей стали;
- торцевая фреза «СКИФ-М», оснащенная пластинами из твердого сплава, диаметром 50 мм;
- концевая фреза диаметром 60 мм по ГОСТ 17026-71 из быстрорежущей стали.

Для проверки станочных параметров установки была адаптирована упомянутая выше модель обработки фасонных винтовых поверхностей в среде T-flex. В рамках модели были получены проекции взаимного расположения тел заготовки и инструмента в зависимости от расчетных параметров для получения заданного профиля. По полученным проекциям проверялись рассчитанные станочные параметры установки инструмента относительно детали.



Рис. 28. Установка инструмента относительно заготовки

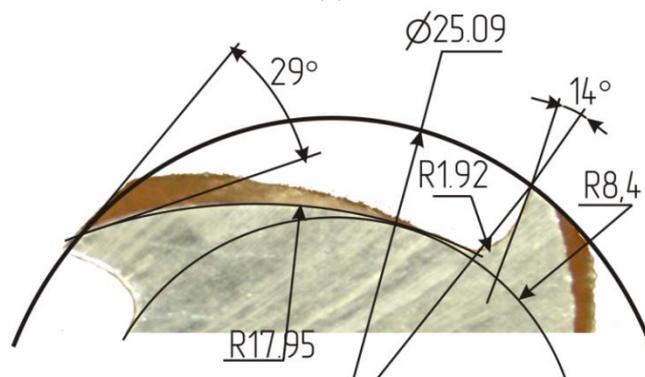


Рис. 29. Контроль размеров обработанной винтовой канавки

Были определены расчетные данные для получения профиля четырехзубой концевой фрезы. В качестве заготовки использовался пруток из стали 40.

Для измерения профиля полученное изделие было разрезано на сегменты и измерено для определения формы в осевом сечении. Полученные образцы были проконтролированы на специализированной координатно-измерительной машине Walter Helicheck Pro+ в лаборатории микрообработки МГТУ «СТАНКИН» (рис. 29). В таблице 9 приведены заданные параметры концевой фрезы и допуски, а также размеры, полученные в результате обработки.

Таблица 9

Контроль размеров полученного профиля канавки концевой фрезы

Параметры профиля винтовой канавки концевой фрезы	Допуск	Расчетные размеры и допуски Δ	Размеры полученного профиля
Внешний диаметр D	По js12	25 (+/-0.105) мм	25.09
Глубина канавки h	IT12/2	4 (+/-0.150) мм	4.14
Радиус спинки зуба r	IT12/2	18 (+/-0.180) мм	17.95
Радиус дна канавки ρ	IT12/2	2 (+/-0.1)	1.92
Передний угол γ	$\pm 1^\circ$	$14^\circ \pm 1^\circ$	14°
Задний угол α	$\pm 1^\circ$	$10 \pm 1^\circ$	Формируется на последующих операциях
Ширина ленточки f	IT12/2	1.5 (+/-0.1) мм	Формируется на последующих операциях
Окружной шаг ψ	$\pm 3^\circ$	$85^\circ \pm 3^\circ$	87
Угол спинки зуба α_1	$\pm 2^\circ$	$30 \pm 2^\circ$	29°

Полученный результат соответствует расчетному профилю в рамках заданной точности.

Приложение. Патенты на изобретения и полезные модели; акты о внедрении результатов диссертационной работы; дипломы международных выставок.

Заключение

В диссертационной работе решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение для отрасли машиностроения в областях механической обработки, инструментального производства, заключающаяся в разработке унифицированной структуры проектирования режущих инструментов, сформированной на основе установленных взаимосвязей и включающей: расчетные схемы и математические модели, компьютерные симуляции при решении прямых и обратных задач профилирования, определения размеров срезаемых слоев, схем резания, применительно к широкой гамме режущих инструментов: фасонных и стандартных червячных, дисковых и концевых фрез при обработке фасонных винтовых поверхностей деталей.

1. Разработанный унифицированный подход позволяет реализовывать программными средствами и в современных САД-системах модели, решающие прямые и обратные задачи профилирования для широкой гаммы режущих инструментов: фасонных и стандартных червячных, дисковых и концевых фрез при обработке фасонных винтовых поверхностей деталей с заданной точностью.

2. Разработанный метод решения прямой задачи профилирования червячных фрез, основанный на построении огибающей проекций направляющих линий на исходной поверхности при ее дискретных положениях, с учетом кинематики процесса формообразования, построенных во взаимосвязях между исходным профилем детали, параметрами установки при обработке фасонных, и в том числе винтовых, поверхностей деталей, позволяет: проектировать инструмент с заданной точностью, производить расчет в один этап минуя определение профиля сопряженной с деталью косозубой рейки, что открывает возможности применения червячных фрез, в том числе многозаходных для обработки винтовых поверхностей произвольного профиля взамен дискового инструмента, с повышением производительности не менее чем в 2.5 раза.

3. Разработанный метод решения обратной задачи профилирования при обработке фасонных и, в том числе винтовых, поверхностей, основанный на построении огибающей проекций направляющих линий на исходной поверхности при ее дискретных положениях, с учетом кинематики процесса формообразования, построенных во взаимосвязях между исходным профилем инструментальной поверхности, параметрами установки, применительно к червячным и дисковым инструментам, позволяет производить оценку влияния параметров установки на форму обрабатываемой поверхности, оценить верность решения прямой задачи профилирования, позволяет определять параметры установки инструменты в случае применения инструмента стандартного профиля.

4. Разработанный метод определения схемы резания и толщин срезаемых слоев, позволяет в зависимости от кинематики процесса обработки, конструкции инструмента и подачи, формировать схемы резания с последующим анализом изменения кинематических задних углов в процессе обработки, и применим для различных случаев сложных процессов формообразования, так же он является отдельным самостоятельным методом решения обратной задачи профилирования.

5. Разработанный метод определения схемы резания позволил реализовать параметрические трехмерные симуляционные модели процессов обработки винтовых стружечных канавок концевых фрез и шлицевых валов в среде трехмерного параметрического моделирования T-flex CAD 3D.

6. Разработанный унифицированный подход позволяет реализовать на базе математических моделей универсальную модульную систему решения задач профилирования червячных фрез для обработки различных деталей с поверхностями стандартных и специальных форм, в том числе и винтовых, что позволило интенсифицировать автоматизированное проектирование специальных червячных фрез для обработки партии концевых фрез на предприятии ООО «Инструмент». Экспериментально и в рамках

производственного процесса подтверждено, что спроектированные специальные червячные фрезы для обработки винтовых стружечных канавок цельных концевых фрез из быстрорежущей стали диаметром 16 мм и 18 мм, позволили повысить производительность операции фрезерования в 2.5 раза по сравнению с обработкой дисковыми фрезами.

7. В рамках экспериментальных исследований и внедрения результатов работы в производство разработанная универсальная модульная система решения задач профилирования червячных фрез была применена на предприятии ООО «Заря-Инструмент». Были спроектированы и изготовлены специальные цельные твердосплавные червячные фрезы (ВК6) для обработки зубчатых колес специального профиля, которые в ходе производственных испытаний позволили повысить производительность до 15 %, а точность профиля изготовленных колес повысилась не менее чем на 20 %.

8. Разработанный метод определения схемы резания и толщин срезаемых слоев на различных стадиях процесса обработки фасонных, и в том числе винтовых, поверхностей деталей стандартной или специальной формы фасонными и стандартными червячными, дисковыми и концевыми фрезами позволяет оценить изменения кинематических задних углов в зависимости от кинематики процесса, параметров установки и режимов обработки, а также установить степень загрузки участков режущих кромок. Это позволяет проектировать инструмент с учетом этих факторов, что в значительной степени повышает эффективность его использования.

9. Результаты работы были использованы в рамках выполнения программы «Развитие отечественного станкостроения и инструментальной промышленности» на 2011–2016 годы федеральной целевой программы «Национальная технологическая база» при выполнении четырех НИОКР.

10. Результаты работы использовали в учебном процессе кафедры ИТ и ТФ при подготовке бакалавров и магистров, а также в учебно-методических материалах при проведении занятий в рамках Президентской программы повышения квалификации инженерных кадров на 2012-2014 годы по направлению «Проектирование специального инструмента из наноструктурированных инструментальных материалов с нанопокрытиями для высокотехнологичных предприятий оборонно-промышленного комплекса и ядерного энергетического машиностроения».

11. Результаты работы апробированы и внедрены на предприятиях ООО «Инструмент», ПАО «МИЗ», ООО «Заря-Инструмент», ООО «Часовое производство «Полет-Хронос» и ОАО «Станкоагрегат».

Разработанные в рамках работы изобретения представлялись на международных выставках и конкурсах, и были отмечены наградами: бронзовая медаль на конкурсе «Лепин-2012» (Ассоциация изобретателей и производителей

Франции (A.I.F.F.)); медаль «Inventeco 2012» (A.N.D.I. – национальная ассоциация изобретателей Италии).

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях из перечня ВАК:

1. **Домнин П.В.** Математическое моделирование винтовых поверхностей сверла в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 1 (56). – С. 106-110.
2. **Домнин П.В.** Исследование процесса формообразования цельных мелко модульных твёрдосплавных червячных фрез с помощью технологии электроэрозионной обработки // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 1 (56). – С. 95-100.
3. **Домнин П.В.** Определение схемы резания процесса обработки фасонных винтовых поверхностей инструментом стандартного профиля // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 3 (58). – С. 38-42.
4. **Домнин П.В.** Математическое моделирование профиля шлицевого вала с помощью средств математического программирования в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. – 2021. – № 3 (58). – С. 34-37.
5. **Домнин П.В.** Модель формы режущих кромок специальных червячных фрез для обработки фасонных винтовых поверхностей // Справочник. Инженерный журнал с приложением. – 2021. – № 11 (296). – С. 38-42.
6. **Домнин П.В.** Формирование фасонных винтовых поверхностей стандартными концевыми и торцевыми фрезами // Главный механик. – 2013. – № 11. – С. 39-46.
7. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.**, Сяочуан Ч. Математическая модель определения профиля червячных фрез // Вестник машиностроения. – 2020. – № 1. – С. 10-13.
8. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.**, Желтиков С.А. Исследование процесса изготовления часовых твёрдосплавных червячных фрез с применением электроэрозионной обработки // СТИН. – 2021. – № 7. – С. 4-6.
9. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Численный метод профилирования инструментов, работающих по методу обкатки // СТИН. – 2019. – № 8. – С. 22-24.
10. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.**, Чжэн С. Профилирование червячных фрез численным методом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8-2. – С. 341-347.
11. Рябов Е.А., Петухов Ю.Е., Хисамутдинов Р.М., Юрасов С.Ю., Юрасов Ю.С., Кузнецов В.А., Исаев А.В., **Домнин П.В.** Выбор наладочного параметра для получения цилиндрического участка концевых сфероцилиндрических фрез на пятикоординатных станках // СТИН. – 2019. – № 8. – С. 20-22.
12. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Математическое моделирование винтовой канавки концевой фрезы с помощью средств математического программирования в среде Mathcad // Вестник МГТУ Станкин. – 2017. – № 4 (43). – С. 100-104.
13. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Математическая модель схемы резания при формообразовании фасонной винтовой канавки стандартными фрезами //

- Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 8-1. – С. 37-46.
14. Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Пивкин П.М., Исаев А.В., Романов В.Б., **Домнин П.В.** Точение деталей сложного профиля с обеспечением заданного микрорельефа поверхности // СТИН. – 2015. – № 8. – С. 13-16.
15. **Домнин П.В.**, Гарифуллин А.А. Изготовление твердосплавных червячных фрез средствами электроэрозионной обработки // Научная жизнь. – 2015. – № 3. – С. 39-45.
16. **Домнин П.В.**, Гарифуллин А.А. Изготовление твердосплавных мелко модульных червячных фрез путем электроэрозионной обработки // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2015. – № 3-4. – С. 3-10.
17. Колесов Н.В., **Домнин П.В.**, Завьялов С.С. Алгоритм расчета дискового инструмента для обработки винтовых поверхностей // СТИН. – 2014. – № 10. – С. 15-16.
18. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Определение задних кинематических углов при обработке винтовых фасонных поверхностей стандартными фрезами прямого профиля // Вестник МГТУ Станкин. – 2014. – № 2 (29). – С. 27-33.
19. **Домнин П.В.** Формирование фасонных винтовых поверхностей стандартными концевыми и торцевыми фрезами // Главный механик. – 2013. – № 11. – С. 39-46.
20. Гречишников В.А., **Домнин П.В.**, Косарев В.А., Петухов Ю.Е., Романов В.Б., Седов Б.Е. Современные методы решения задач формообразования сложного режущего инструмента // СТИН. – 2013. – № 12. – С. 6-11.
21. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Точность профилирования при обработке винтовой фасонной поверхности // СТИН. – 2011. – № 7. – С. 14-17.
22. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Способ формообразования фасонной винтовой поверхности стандартным инструментом прямого профиля // Вестник МГТУ Станкин. – 2011. – № 3 (15). – С. 102-106.
23. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Компьютерное моделирование обработки винтовой канавки на заготовке концевой фрезы // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – № 2 (12). – С. 156-164.
24. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Решение обратной задачи профилирования на базе схемы численного метода заданных сечений // Справочник. Инженерный журнал. – 2011. – № 11. – С. 26-29.

В изданиях, индексируемых международными наукометрическими базами Scopus и Web of Science:

25. Petukhov Y.E., **Domnin P.V.**, Zheltikov S.A. Manufacture of hard-alloy hobs by electrical discharge machining // Russian Engineering Research. – 2021. – V. 41, Is. 10. – P. 936-938.
26. Petukhov Y.E., **Domnin P.V.** Determining worm-mill profiles // Russian Engineering Research. – 2020. – V.40. – P. 283-286.
27. Petukhov Y.E., **Domnin P.V.** Numerical shaping method for hobbing tools // Russian Engineering Research. – 2020. – V.40. – P.76-78.

28. Ryabov E.A., Petukhov Yu.E., Khisamutdinov R.M., Yurasov S.Yu., Yurasov Yu.S., Kuznetsov V.A., Isaev A.V., **Domnin P.V.** Fitting parameters in the cylindrical section of ball-end mills for five-coordinate machine tools // Russian Engineering Research. – 2020. – V.40. – P. 73-75.
29. Grechishnikov V.A., Petukhov Y.E., Romanov V.B., Isaev A.V., **Domnin P.V.**, Pivkin P.M. Improved precision of trapezoidal thread // Russian Engineering Research. – 2018. – V. 38, Is. 12. – P. 1018-1021.
30. Grechishnikov V.A., Petukhov Y.E., Pivkin P.M., Isaev A.V., Romanov V.B., **Domnin P.V.** Lathe turning of complex-shaped parts providing desired surface microrelief // Russian Engineering Research. – 2016. – V. 36, Is. 3. – P. 229-231.
31. Petukhov Y.E., **Domnin P.V.**, Rubets A.A. Nondestructive assessment of the cutting properties of wheels with a single-layer diamond-galvanic coating // Russian Engineering Research. – 2016. – V. 36, Is. 4. – P. 309-311.
32. Kolesov N.V., **Domnin P.V.**, Zavyalov S.S. Disk tool for machining helical surfaces // Russian Engineering Research.–2015. – V. 35, Is.4. –P. 290-291.
33. Grechishnikov V.A., **Domnin P.V.**, Kosarev V.A., Petukhov Yu. E., Romanov V.B., Sedov B.E. Shaping by means of complex cutting tools // Russian Engineering Research. – 2014. – V. 34, Is.7. – P. 461-465.
34. Petukhov Y.E., **Domnin P.V.** Shaping precision in machining a screw surface // Russian Engineering Research. – 2011. – V. 31, Is. 10. – P. 1013-1015.

В сборниках трудов всероссийских и международных конференций:

35. **Домнин П.В.** Исследование формы задней поверхности червячных фрез для обработки фасонных винтовых поверхностей // В сборнике: Станкостроение и цифровое машиностроение. Материалы всероссийской научно-технической конференции (07.04.2021 – 09.04.2021). Уфа, 2021.
36. **Домнин П.В.**, Петухов Ю.Е. Численный метод профилирования червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности // В сборнике: Будущее машиностроения России. Сборник докладов Двенадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием). – 2019. – С. 41-44.
37. **Домнин П.В.** Профилирование червячной фрезы для обработки фасонной винтовой поверхности с помощью численной математической модели // В сборнике: Машиностроение: традиции и инновации (МТИ – 2019). Материалы XII Международной конференции. – 2019. – С. 58-61.
38. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Способ определения профиля обрабатываемой поверхности по известному профилю инструмента // В сборнике: Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов. Сборник научных статей II международной молодежной научно-технической конференции: в 2 томах. – 2016. – С. 86-90.
39. **Домнин П.В.**, Гарифуллин А.А. Изготовление твердосплавных червячных фрез средствами электроэрозионной обработки // В сборнике: Страна живет, пока работают заводы. Сборник научных трудов Международной научно-

технической конференции. Ответственный редактор Овчинкин О.В. – 2015. – С. 109-114.

40. **Домнин П.В.**, Тимофеева А.А. Формирование базы знаний процесса проектирования инструмента для обработки канавок в глубоких отверстиях // В сборнике: Реальность – сумма информационных технологий. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Ответственный редактор Пыхтин А.И. – 2015. – С. 60-64.

41. Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** Компьютерная модель формообразования сложной поверхности // В сборнике: Автоматизация: проблемы, идеи, решения/ Материалы международной научно-технической конференции: в 2 томах. – 2010. – С. 197-200.

В других изданиях:

42. Справочник технолога-машиностроителя / Андреев В.Н., Афонин А.Н., Безъязычный В.Ф., Берлинер Э.М., Болдырев А.И., Булошников В.С., Вартанов М.В., Васильев С.Г., Верещака А.С., Виноградов Д.В., Древаль А.Е., Гиловой Л.Я., Гречишников В.А., Даниленко Б.Д., **Домнин П.В.**, Заставный Е.А., Зубков Н.Н., Киричек А.В., Кирсанов С.В., Клауч Д.Н. и др. – М., 2018. – Том 2.

43. Профилирование фасонных дисковых фрез для нарезания стружечных канавок с использованием САПР: Монография / Ю.Е. Петухов, **П.В. Домнин.** – М.: ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», 2019. – 121 с.: ил.

44. Формообразование фасонных винтовых поверхностей инструментов на основе применения стандартных концевых и торцевых фрез: Монография / Ю.Е. Петухов, **П.В. Домнин.** – М., 2012. – 130 с.: ил.

Объекты интеллектуальной собственности:

45. Патент РФ на изобретение RU 2587201 С2 «Способ определения профиля винтовой фасонной поверхности детали» / Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.**, Водовозов А.А., Рощупкин А.В. // 20.06.2016. Заявка №2014146191/02 от 18.11.2014.

46. Патент на изобретение RU 2447972 С2 «Способ формообразования фасонных винтовых поверхностей» / Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.** // 20.04.2012. Заявка №2010125848/02 от 24.06.2010.

47. Патент РФ на изобретение RU 2574627 С1 «Инструмент для обработки канавок» / Петухов Ю.Е., **Домнин П.В.**, Тимофеева А.А. // 10.02.2016. Заявка №2014146181/02 от 18.11.2014.

48. Патент РФ на изобретение RU 2542891 С2 «Шлифовальный круг» / Петухов Ю.Е., Рубец А.А., **Домнин П.В.**, Водовозов А.А. // 27.02.2015. Заявка № 2013104282/02 от 04.02.2013.

49. Патент на изобретение RU 2533611 С2 «Способ определения режущей способности абразивно-алмазного инструмента с однослойным алмазно-гальваническим покрытием» / Петухов Ю.Е., Рубец А.А., **Домнин П.В.**, Водовозов А.А. // 20.11.2014. Заявка № 2013106670/02 от 15.02.2013.

Научное издание

Домнин Петр Валерьевич

**Повышение эффективности инструмента при обработке
сложнопрофильных, в том числе винтовых, поверхностей на базе
цифровых технологий формообразования**

*Автореферат диссертации
на соискание ученой степени доктора технических наук*