

На правах рукописи
УДК 621.99

Павлюченков Игорь Анатольевич

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕЗЬБОВЫХ ФРЕЗ
С УЧЁТОМ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Специальность:
2.5.5 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном
бюджетном образовательном учреждении высшего образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: **Мальков Олег Вячеславович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Истоцкий Владислав Владимирович**
доктор технических наук,
генеральный директор
ООО НПП «РИТ-Инжиниринг»

Копылов Владимир Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры тех-
нологии машиностроения, металлорежущих стан-
ков и инструментов ФГАОУ ВО «Российский
университет дружбы народов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образо-
вательное учреждение высшего образования
«Московский государственный технический уни-
верситет «СТАНКИН»

Защита состоится «__» _____ 2022 г. в _____ час.
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по
адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью органи-
зации, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана
и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

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



А.В. Богданов

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Резьбовое соединение является одним из самых распространенных элементов в изделиях машиностроительного производства. В настоящее время процесс резьбофрезерования становится все более распространенным в области нарезания резьбы, что связано с такими его существенными преимуществами как универсальность, способность изготовить резьбы в большинстве обрабатываемых материалов, в том числе термообработанных (≤ 60 HRC), высокая надежность процесса (получение мелкой стружки, возможность корректировки размеров резьбы, возможность легкого извлечения сломанного инструмента из отверстия), высокое качество обработанной резьбы, использование стандартного вспомогательного инструмента (как для обычных фрез) и ряда других.

Широкому внедрению концевых гребенчатых резьбовых фрез в производство способствует массовое использование на предприятиях станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Точность изготавливаемой таким инструментом резьбы определяется погрешностями её параметров, которые вносятся кинематической системой и конструкцией режущего инструмента, поэтому на первый план выходит проектирование резьбовых фрез, которые можно изготовить на современных инструментальных шлифовально-заточных станках с ЧПУ и геометрические параметры которой позволяют обеспечить необходимый класс точности изготавливаемой резьбы.

подавляющее большинство резьбовых фрез, используемых на предприятиях в Российской Федерации, закупается у зарубежных производителей, в связи с чем, актуальной является задача импортозамещения конструкций резьбовых фрез.

На сегодняшний день в Российской Федерации существует один стандарт на резьбовые фрезы из быстрорежущей стали (ГОСТ 1336-77). В современных конструкциях резьбовых фрез наиболее рационально применение твердого сплава, однако для таких фрез отсутствует методика расчёта и рекомендации по технологии изготовления. Это затрудняет использование резьбовых фрез, особенно в условиях отличных от представленных в каталогах производителей.

Существующие в настоящее время системы проектирования режущих инструментов не обеспечивают технологичность конструкции резьбовых фрез. Разработка системы проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез позволит снизить трудоемкость технологической подготовки производства на основе снижения времени на подготовку конструкторской и технологической документации.

Исходя из вышесказанного, работа, направленная на разработку и исследование резьбовых фрез, а также разработку системы проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез является актуальной.

Цель работы - разработка системы проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез с учётом технологических возможностей инструментальных шлифовально-заточных станков с ЧПУ.

Основные задачи исследования:

1. Разработать систему обеспечения точности формообразования резьбы при резьбофрезеровании на основе установленных параметров конструкции инструмента.

2. Разработать систему математических зависимостей для формообразования профиля стружечной канавки концевых гребенчатых резьбовых фрез с учетом возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ.

3. Разработать систему математических зависимостей для формообразования резьбообразующих профилей зубьев концевых гребенчатых резьбовых фрез шлифовальным кругом с осью общего положения.

4. Разработать систему расчёта, назначения и контроля геометрических параметров концевых гребенчатых резьбовых фрез с учетом технологичности их изготовления.

5. Разработать алгоритм и систему проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез с автоматизированным созданием рабочего чертежа и сопровождающей документации.

6. Изготовить опытные образцы концевых гребенчатых резьбовых фрез для оценки их работоспособности и апробации разработанной системы проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез в условиях производства.

Объект исследования – концевые гребенчатые резьбовые фрезы.

Предметная область – алгоритм и система проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез для фрезерования внутренней резьбы по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента с учётом технологических возможностей инструментальных шлифовально-заточных станков с ЧПУ и системы ограничений.

Научная новизна.

1. Установлен перечень параметров, определяющий конструкцию концевых гребенчатых резьбовых фрез, и установлена система математических зависимостей, которые позволяют формализовать задачи профилирования стружечной канавки и зубьев, получения исходной инструментальной поверхности и формообразования резьбы заданного класса точности.

2. Решена задача профилирования стружечных канавок при смещении и повороте шлифовального круга согласно кинематической схеме шлифовально-заточного станка с ЧПУ. Предложена математическая зависимость, определяющая профиль стружечной канавки, которая позволяет рассчитать ее параметры (диаметр сердцевинки, передний угол, центральный угол раскрытия, площадь) для формообразования резьбы заданного класса точности.

3. Доказана возможность и решена задача профилирования зубьев концевых гребенчатых резьбовых фрез с использованием шлифовального круга стандартного профиля с осью общего положения, что позволяет управлять формой и параметрами резьбообразующего профиля на зубе концевых гребенчатых резьбовых фрез. Предложена математическая зависимость для определения формы резьбообразующего профиля зуба, что позволяет рассчитать его параметры для формообразования резьбы заданного класса точности. Предложена последовательность проверки числа зубьев при условии отсутствия подреза следующего зуба.

4. Установлены зависимости силы резания от подачи на зуб, номинального диаметра, длины и шага резьбы, диаметра рабочей части инструмента, позволяющие оценить прочность конструкции концевых гребенчатых резьбовых фрез.

Установлены зависимости угла конусности получаемой резьбы от подачи на зуб, номинального диаметра и длины резьбы, позволяющие оценить точность резьбы.

Методы исследования и достоверность. Работа выполнена с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования и моделирования на персональном компьютере. При подготовке и обработке результатов проведенных экспериментов использованы основные положения теории резания материалов, методы теории вероятностей и математической статистики и пр. Верификация разработанного алгоритма проведена методами функционального тестирования. Достоверность результатов подтверждается корректным применением методов математической статистики при обработке полученных в результате проведенного эксперимента силовых характеристик процесса резьбофрезерования, достаточной репрезентативностью статистических выборок и соответствием результатов экспериментальных и теоретических исследований, корректным сравнением расчётных и экспериментальных моделей, апробацией результатов работы на спроектированных, изготовленных и испытанных опытных образцах концевых гребенчатых резьбовых фрез.

Практическая значимость работы.

1. Разработан алгоритм расчета конструктивных элементов и геометрических параметров концевых гребенчатых резьбовых фрез.

2. Разработана система проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез, позволяющая получить рабочий чертеж таких фрез с исходными и рассчитанными конструктивными элементами и геометрическими параметрами, геометрическими и установочными параметрами шлифовальных кругов для их изготовления на шлифовально-заточных станках с ЧПУ, параметрами эксплуатации инструмента.

3. Разработана и внедрена в систему проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез программа автоматизированной генерации элементов управляющей программы изготовления концевых гребенчатых резьбовых фрез на шлифовально-заточных станках с ЧПУ.

4. Проведена апробация системы проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез на основе разработки и внедрений их конструкций на предприятиях ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ», ФГУП «НПЦАП».

Апробация работы. Результаты работы представлены и обсуждались на научных семинарах кафедры «Инструментальная техника и технологии» МГТУ имени Н.Э. Баумана, а также научно-технических конференциях: Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2012 – 2014, 2016, 2019); Международная молодежная конференция «Инновации в машиностроении» (г. Томск, 2012); Всероссийская научно-техническая конференция студентов «Студенческая научная весна 2013: Машиностроительные технологии» (Москва, 2013); XX научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов (г. Королёв, 2014); Первая международная заочная научно-техническая конференция «Технологическое обеспечение машиностроительных производств» (Челябинск, 2014); 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Челябинск, 2019); Международная научно-техническая конференция,

посвящённая 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» (Москва, 2019); Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского (Москва, 2020).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 17 научных работ, в том числе 4 работы, входящих в перечень ВАК РФ, 1 работа, входящая в список изданий, рецензируемых в SCOPUS, 2 свидетельства о регистрации программы ЭВМ, 1 патент на изобретение. Общий объем 2,19 п.л.

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены лично автором и при его непосредственном участии в экспериментальных и расчётных работах.

Положения, выносимые на защиту.

1. Система обеспечения точности формообразования резьбы при резьбофрезеровании на основе установленных зависимостей и ограничений геометрических параметров инструмента с учетом технологичности его изготовления.
2. Алгоритм расчёта конструктивных элементов и геометрических параметров концевых гребенчатых резьбовых фрез, а также система проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез, позволяющие на основе математических зависимостей и с учетом технологических возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ получить конструкцию инструмента для формообразования резьбы заданного класса точности.
3. Полученные экспериментальные зависимости силы резания от подачи на зуб, номинального диаметра, длины и шага резьбы, диаметра рабочей части инструмента, а также угла конусности нарезаемой резьбы от подачи на зуб, номинального диаметра и длины резьбы.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки: пункту 2 – моделирование процесса резьбофрезерования; пункту 4 – создание инструмента, обеспечивающего фрезерование резьбы принятого класса точности.

Реализация работы. По результатам работы были спроектированы концевая гребенчатая резьбовая фреза диаметром 6 мм (М8-4Н5Н) и комбинированная концевая гребенчатая резьбовая фреза диаметром 2,2 мм со сверлильной частью на торце (М3-6Н), которые были изготовлены на базе ФГУП «НПЦАП» и ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ». Инструменты прошли производственные испытания, показали свою работоспособность, обеспечили заданную точность изготовленных резьб и внедрены в производственную программу предприятий.

Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ имени Н.Э. Баумана в дисциплинах «Автоматизированное проектирование инструментальных систем», «Компьютерное проектирование операций механической обработки», «Научно-исследовательская работа», «Основы компьютерного проектирования», «Основы проектирования режущих инструментов», «Инженерный анализ конструкций методом конечных элементов», «Технология изготовления инструментов на шлифовально-заточном станке с ЧПУ» для студентов, обучающихся по специальностям 15.05.01 и 15.04.02.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из шести глав, общих выводов, списка использованной литературы из 141 наименований и приложений. Работа содержит 295 страниц, в том числе 263 основного текста, 115 рисунков, 54 таблицы, а также приложения на 32 страницах.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, приведены цель и задачи, поставленные для достижения этой цели, научная новизна и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ работ в области резбифрезерования и проектирования резьбовых фрез. Вклад в разработку конструкций резьбовых фрез и их отдельных конструктивных элементов, исследование точности их изготовления и особенностей эксплуатации внесли: в области резбифрезерования инструментами с винтовой производящей поверхностью – Воронов В.Н., Глушко Е.В., Лашнев С.И., Лоцманенко В.В., Люкшин В.С., Серова Е.В., Солянкин Д.Ю., Ямников А.С.; в области резбифрезерования дисковыми и гребенчатыми фрезами – Барбашов Ф.А., Виксман Е.С., Гречишников В.А., Древаль А.Е., Зорохович А.А., Косарев В.А., Косарев Д.В., Левицкий М.Я., Литвиненко А.В., Мальков О.В., Махров С.А., Никитин В.К., Сайкин С.А., Шашков Е.В., Этин А.О. и др.

Проведен анализ резьб, используемых в машиностроении, для выявления наиболее часто применяемых при обработке фрезерованием. Проведен анализ существующих конструкций концевых гребенчатых резьбовых фрез, которые в сравнении с одно-, двух- или трехдисковыми являются более производительными, так как могут обрабатывать резьбу сразу на всю длину.

В работе рассмотрены цельные конструкции концевых гребенчатых резьбовых фрез (далее – резьбовые фрезы), изготовленные из твердого сплава или быстрорежущей стали, для

обработки внутренней резьбы по кинематической схеме с параллельными осями резьбы и инструмента, включающей: исходное положение фрезы (Рисунок 1, а), подвод в зону обработки (Рисунок 1, б), тангенциальное врезание (Рисунок 1, в), изготовление резьбы (Рисунок 1, г), вывод на ось резьбы (Рисунок 1, д), отвод из

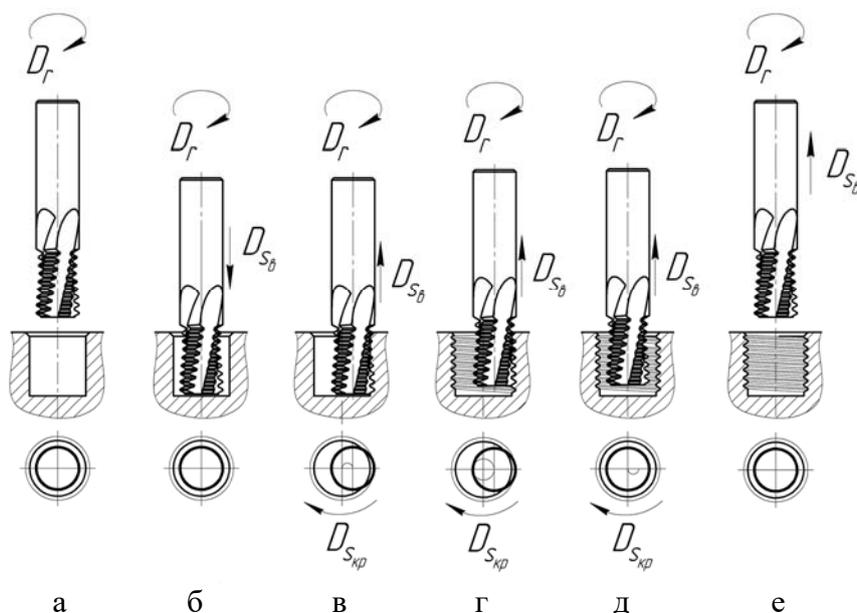


Рисунок 1. Схема работы резьбовой фрезы.

зоны обработки (Рисунок 1, е).

Проведен анализ литературных источников с целью выявления зависимостей, позволяющих рассчитать геометрические параметры резьбовых фрез. Обзор

показал отсутствие методики для проектирования резьбовых фрез, отсутствие или неоднозначность расчётных зависимостей для ряда параметров. Проведен анализ видов и возможных причин отказа резьбовых фрез, что позволило учесть наименее прочные конструктивные элементы при проектировании их конструкций.

Рассмотрены особенности систем проектирования режущих инструментов. Выявлен ряд программ, позволяющих рассчитать отдельные элементы конструкций фрез, конструкцию фрез в целом или произвести подбор конструкции инструмента. Однако не выявлены программы, позволяющие системно рассчитать конструкцию резьбовых фрез при их изготовлении с учетом проведенного анализа возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ (далее – шлифовальные станки с ЧПУ), проверить точность формообразуемой резьбы и получить рабочий чертеж резьбовой фрезы и документацию.

Во второй главе определены виды необходимых исследований и в соответствии с ними разработаны исследовательские стенды, включающие в себя металлообрабатывающее оборудование, приспособления и контрольно-измерительную аппаратуру для измерения составляющих силы резания и контроля резьбы.

Для создания зависимостей, позволяющих оценить силу резания, прогнозирования допустимой области обработки резьбой фрезой разработан план эксперимента по определению зависимостей составляющей силы резания в плоскости перпендикулярной оси изготавливаемой резьбы от подачи на зуб, номинального диаметра, длины и шага резьбы, диаметра рабочей части инструмента, а также угла конусности изготавливаемой резьбы от подачи на зуб, номинального диаметра и длины резьбы.

Для проведения экспериментальных исследований используется трехкоординатный фрезерный станок с ЧПУ DMC 635 V EcoLine, резьбовые фрезы из твердого сплава производства Sandvik Coromant диаметрами от 6 до 14 мм, заготовки из стали 45. Для комплексного контроля изготавливаемых резьб используются резьбовые калибры. Для измерения составляющих силы резания используется динамометрический стенд на базе трехкомпонентного динамометра Kistler. Для разрезки деталей с изготовленными резьбовыми отверстиями вдоль линий осевых сечений отверстий используется электроэрозионный вырезной станок АРТА 453 ПРО, для измерения угла конусности полученной резьбы на разрезанных деталях используется универсальный измерительный микроскоп УИМ-21.

Для подтверждения математических зависимостей, определяющих профиль стружечных канавок (далее канавок) резьбовых фрез, на универсальном заточном станке 3Д642Е с использованием приспособления для заточки инструмента с винтовыми канавками 3Е642Е разработан план эксперимента по исследованию влияния установочных параметров шлифовального круга на профиль канавок. При проведении эксперимента используется шлифовальный круг из электрокорунда белого 25А типа 1 (прямой профиль) диаметром 151,6 мм, высотой 20,5 мм, в качестве заготовок используются прутки \varnothing 40 мм из капролона (полиамид 6 блочный) по ТУ 2224-036-00203803-2012. На каждой заготовке изготавливаются 3 различные канавки, каждая из заготовок разрезается в торцевом сечении и профиль канавок оцифровывается для проведения сравнительного анализа.

Для подтверждения математических зависимостей, определяющих форму резьбообразующего профиля зубьев резьбовых фрез на резьбошлифовальном станке модели 5822 разработан план эксперимента по исследованию влияния установочных параметров шлифовального круга на углы резьбообразующего профиля на зубе резьбовой фрезы. При проведении эксперимента используются шлифовальный круг из электрокорунда нормального 14А тип 4 (двусторонний конический профиль с углом 60°) диаметром 374 мм. Для упрощения проведения последующих измерений и анализа в качестве заготовок используются тонколистовые заготовки, закрепленные на станке при помощи оправки.

В третьей главе разработан типовой параметризованный рабочий чертеж прототипа резьбовой фрезы на основе анализа существующих конструкций, который позволил определить объём и структуру параметров, задающих конструкцию резьбовой фрезы, и позволил произвести расчёт конструктивных элементов с учётом ограничений.

Предложен технологический подход к проектированию резьбовых фрез (Рисунок 2), на основе которого разработана система их проектирования (Рисунок 3), принцип которой заключается в формообразовании элементов инструмента в соответствии с технологическими переходами его изготовления на шлифовальном станке с ЧПУ и введением ограничений, связанных с используемой кинематической схемой формообразования резьбы с параллельными осями резьбы и инструмента.

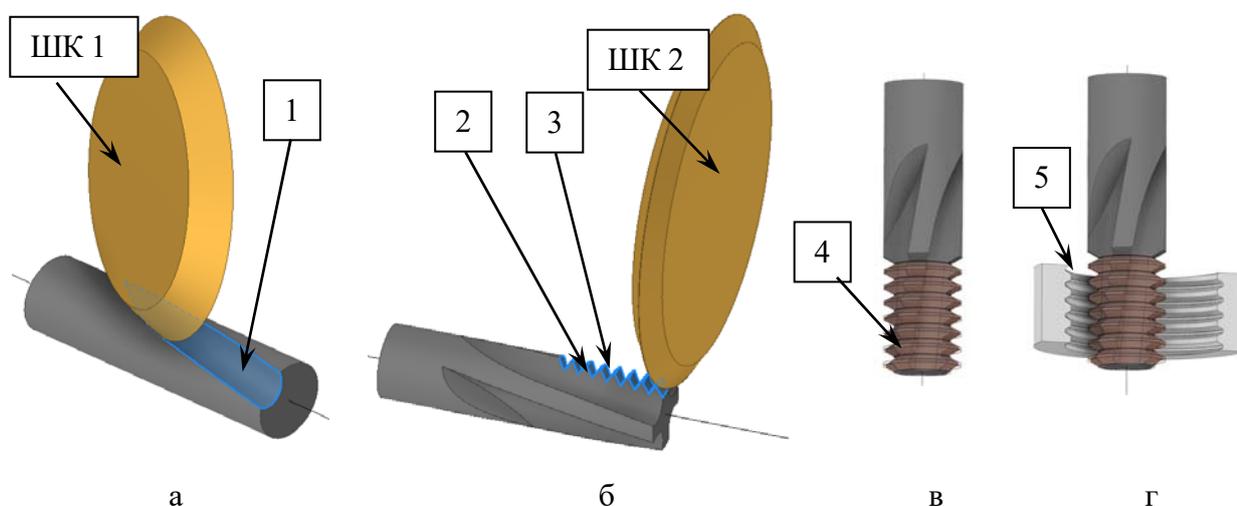


Рисунок 2. Технологический подход к проектированию конструкции резьбовой фрезы: а – профилирование стружечной канавки (1) шлифовальным кругом (ШК 1), б – профилирование зуба шлифовальным кругом ШК 2 по профилю (2), шлифовальным кругом ШК 3 (не указан) по наружному диаметру (3), в – получение исходной инструментальной поверхности (4), г – формообразование резьбы (5).

Установлены формулы и ограничения для определения всех конструктивных элементов и геометрических параметров рабочей, соединительной и крепежной частей резьбовых фрез. Установлены зависимости для стартового назначения диаметров рабочей части: $d_p = 0,741D$ (для крупного шага резьбы), $d_p = 0,793D$ (для мелкого шага резьбы).

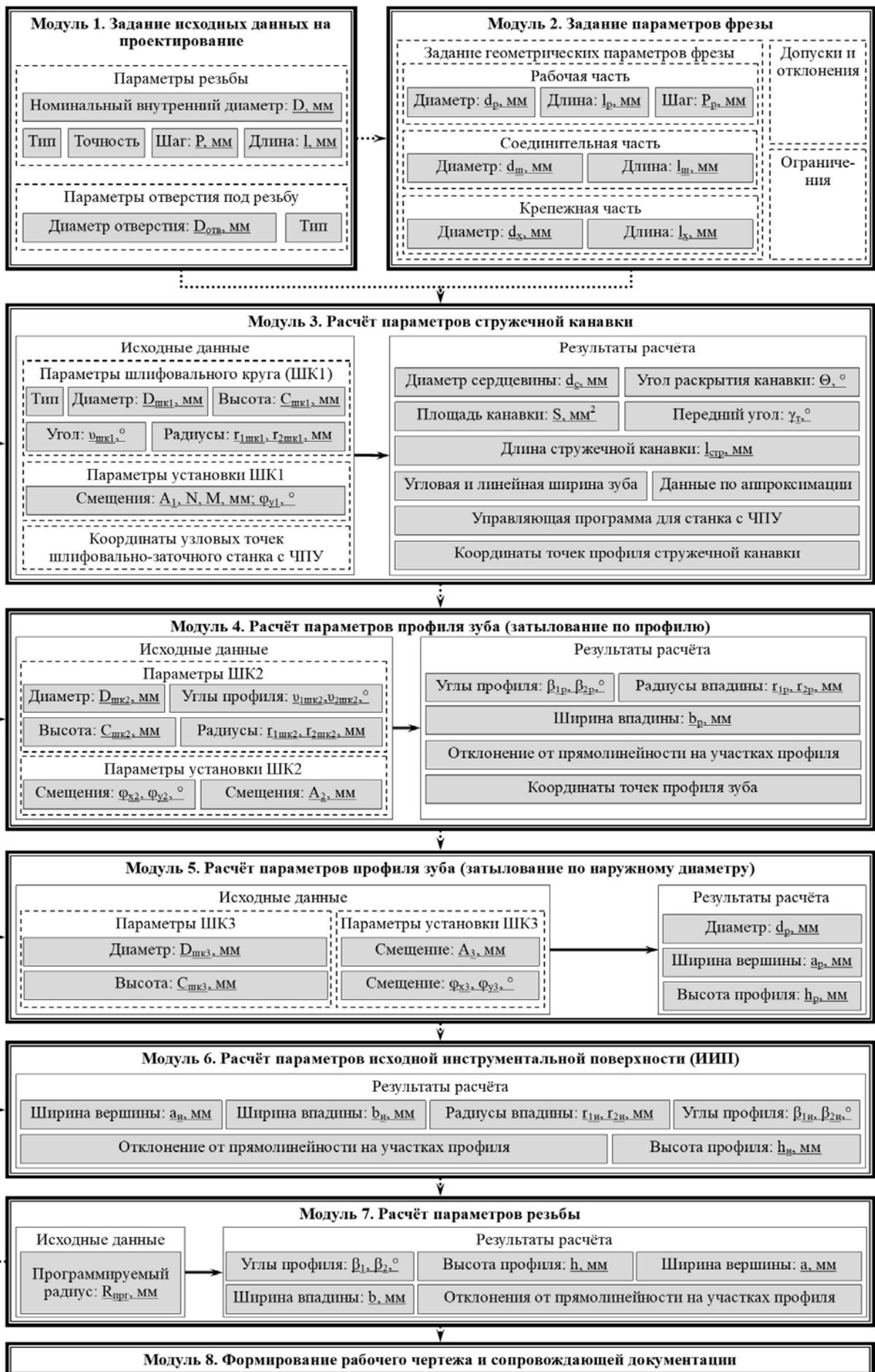


Рисунок 3. Система проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез.

Разработана схема формообразования канавок резьбовых фрез шлифовальными кругами простого профиля (типа 1V1, 1A1 и пр.), которая позволила определить углы резьбообразующего профиля на зубе инструмента с учётом формы передней поверхности, провести проверку и корректировку принятого числа зубьев из условия отсутствия подреза следующего зуба, определить площадь стружечной канавки, оценить прочность зуба.

В результате расчётов предложена математическая зависимость формы профиля стружечных канавок резьбовых фрез в торцевом сечении от формы и размеров шлифовального круга, геометрических параметров изготавливаемой фрезы и их взаимного расположения:

$$\begin{cases} X_d = \left((R_i \cos \psi_j + N) \sin \varphi_{y1} + (C_i + M) \cos \varphi_{y1} \right) \cos \left(\frac{2dz * tg \omega}{d} \right) + (-R_i \sin \psi_j + A_1) \sin \left(\frac{2dz * tg \omega}{d} \right) \\ Y_d = - \left((R_i \cos \psi_j + N) \sin \varphi_{y1} + (C_i + M) \cos \varphi_{y1} \right) \sin \left(\frac{2dz * tg \omega}{d} \right) + (-R_i \sin \psi_j + A_1) \cos \left(\frac{2dz * tg \omega}{d} \right) \\ \psi_j = \arccos \left(\frac{(C_i + M) \sin \varphi_{y1} - N \cos \varphi_{y1} - dz}{R_i \cos \varphi_{y1}} \right) \end{cases}$$

где R_i – радиус элементарного диска шлифовального круга, ψ_j - текущий угловой параметр i -го элементарного диска шлифовального круга, A_1 – расстояние между осями шлифовального круга и цилиндрической заготовки диаметром d , N и M – смещение системы координат шлифовального круга, φ_{y1} – угол поворота шлифовального круга относительно оси заготовки, C_i – расстояние от торца шлифовального круга до i -го элементарного диска, dz - единичное смещение шлифовального круга вдоль оси обрабатываемого цилиндра, ω – угол наклона канавки.

Анализ зависимости позволил установить, что образующая канавки на передней поверхности не является прямолинейной, а также позволил выявить тенденции изменения переднего угла в торцевом сечении, центрального угла раскрытия и площади канавки, диаметра сердцевины в зависимости от параметров изготавливаемой резьбовой фрезы, шлифовального круга и их взаимного расположения.

Сравнение результатов технологического моделирования в ANCA ToolRoom прототипа резьбовой фрезы CoroMill Plura R217.15-140100AC26N с использованием шлифовальных кругов прямого (тип 1A1) и одноуголового (типы 12R4, 1V1) профиля и шлифа торцевого сечения указанной фрезы показало высокую сходимость и позволило в дальнейшем использовать шлифовальные круги простого профиля (типа 1A1, 1V1) для формообразования канавок проектируемых резьбовых фрез.

Для оценки влияния геометрических параметров резьбовых фрез (передний, задний углы в торцевом сечении, угол наклона канавки, диаметр рабочей части, шаг резьбообразующего профиля) на геометрические параметры режущих лезвий установлены зависимости, которые показали, что необходимо выбирать такие параметры, при которых на боковых сторонах резьбообразующего профиля зуба $\alpha > 2^\circ$; использование $\omega \neq 0^\circ$ приводит к появлению углов наклона режущих кромок λ_1, λ_2 с разными знаками. При $\omega = -30^\circ \dots 30^\circ$ $\lambda_1, \lambda_2 = -22^\circ \dots 8^\circ$, что влияет на направление отвода стружки, при этом формируется передний угол в широком диапазоне значений ($\gamma = -22^\circ \dots 29^\circ$).

Предложен способ формообразования задней поверхности зубьев резбовых фрез шлифовальным кругом посредством его поворота на два угла (φ_{x2} и φ_{y2}) вокруг осей, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси резбовой фрезы (Рисунок 4). Способ формообразования задней поверхности позволяет получить резбообразующий профиль на зубьях с различными углами профиля одним типоразмером шлифовального круга с двухсторонним коническим профилем за счет изменения углов φ_{x2} и φ_{y2} , что сокращает время на технологическую подготовку производства, исключает операцию правки шлифовального круга и, таким образом, снижает затраты на наладку операции шлифования. Координаты точек профиля задней поверхности зуба резбовой фрезы получаются комбинацией движений шлифовального круга и резбовой фрезы друг относительно друга в виде:

$$K_p = F * E * D * C * B * A \text{ или } K_p = F * D * E * C * B * A,$$

$$\text{где } A = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ 1 \end{bmatrix} B = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{D_{шк2}}{2} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{y2} & 0 & \sin \varphi_{y2} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_{y2} & 0 & \cos \varphi_{y2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_{x2} & -\sin \varphi_{x2} & 0 \\ 0 & \sin \varphi_{x2} & \cos \varphi_{x2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{z2}) & \sin(\varphi_{z2}) & 0 & 0 \\ -\sin(\varphi_{z2}) & \cos(\varphi_{z2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{d_p}{2} (1 - \varphi_{z2} \operatorname{tg} \alpha_T) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

A, B, C, D, E, F – матричная форма записи координат точек шлифовального круга и действий над ним для получения облака точек, формообразующих профиль на зубе при затыловании. На предложенный способ получен патент на изобретение РФ2732871.

Разработанная система математических зависимостей для расчета формы резбообразующего профиля зуба при формообразовании шлифовальным кругом с осью общего положения, позволила проводить расчёт углов резбообразующего профиля зубьев. В качестве примера реализации расчета приведены зависимости углов профиля резбообразующей части зуба от углов поворота шлифовального круга φ_{x2} и φ_{y2} . На примере резбы М16х2-6Н показана возможность управления углами её профиля в зависимости от установочных углов $\varphi_{x2}, \varphi_{y2}$.

Для принятых параметров резбообразующей части проведен оценочный анализ прочности конструктивных элементов резбовой фрезы с использованием зависимости силы резания, полученной в результате проведенного эксперимента. В результате анализа установлено, что наиболее вероятен выход из строя фрезы в области трех ее элементов: вершины резбообразующего профиля зуба, основания зуба и впадины ближайшего к хвостовику резбообразующего профиля зуба, что согласуется с наблюдаемыми отказами резбовых фрез.

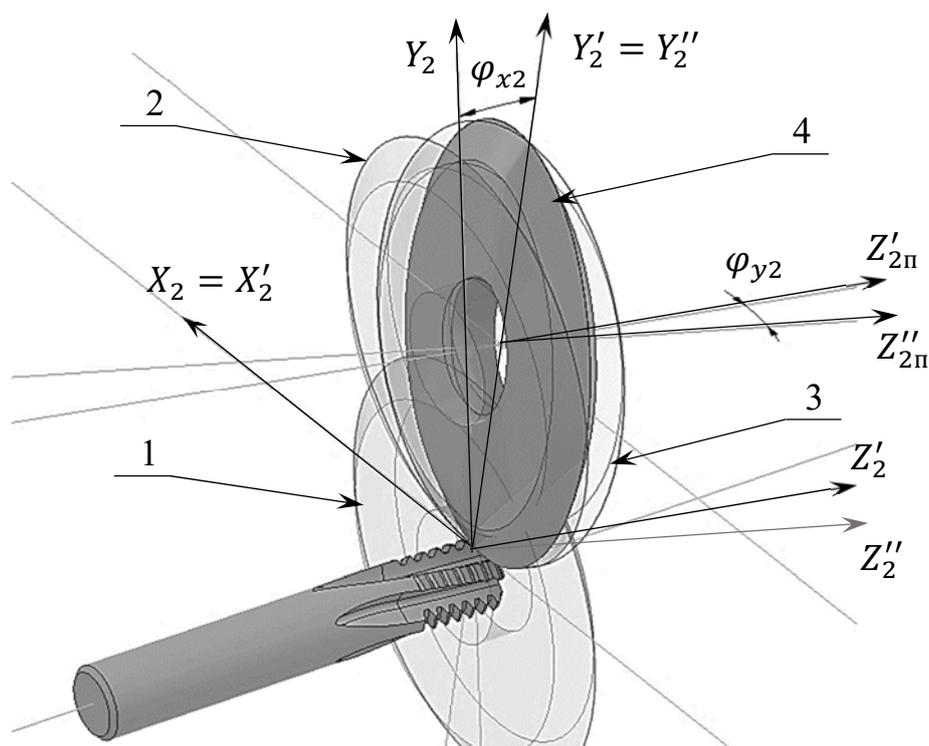


Рисунок 4. Последовательность установки шлифовального круга на зуб резбовой фрезы. (1 – начальное расчётное положение шлифовального круга, 2 – установка шлифовального круга на зуб, 3 – поворот шлифовального круга на угол φ_{x2} , 4 – поворот шлифовального круга на угол φ_{y2}). $Z'_{2п}$ и $Z''_{2п}$ - перенесенные к центру шлифовального круга оси Z'_2 и Z''_2 соответственно.

В четвертой главе предложен алгоритм системы проектирования резбовых фрез, представленный на Рисунке 3.

Проверена возможность создания трехмерной геометрической модели резбовой фрезы на примере использования программы T-FLEX CAD с автоматизированным созданием рабочего чертежа модели, которая показала ограничения и недостатки ее использования.

С учетом недостатков вышеуказанной модели разработана система проектирования концевых гребенчатых резбовых фрез (СПРФ), включающая 8 модулей, соответствующих модулям на Рисунке 3 с возможностью автоматизированного получения рабочего чертежа (Рисунок 5) и сопровождающей конструкторско-технологической документации. Некоторые размеры и расчётные параметры на рабочем чертеже не указаны, а приведены в документации.

Последовательная работа в модулях СПРФ позволяет, контролируя параметры на каждом этапе проектирования по предложенным в главе 3 математическим зависимостям и ограничениям, получать резьбу в пределах принятого поля допуска.

Установлено влияние исходных параметров при проектировании на конструктивные элементы и выходные геометрические параметры резбовых фрез, а также получены зависимости переднего угла в торцевом сечении, диаметра сердцевины, площади стружечной канавки, углов резбообразующего профиля, геометрической погрешности профиля резьбы, углов профиля и отклонений от прямолиней-

ности сторон и впадины резьбового профиля (на резьбе) от геометрических параметров всех типов используемых формообразующих шлифовальных кругов, конструктивных параметров получаемой резьбовой фрезы и их взаимного расположения.

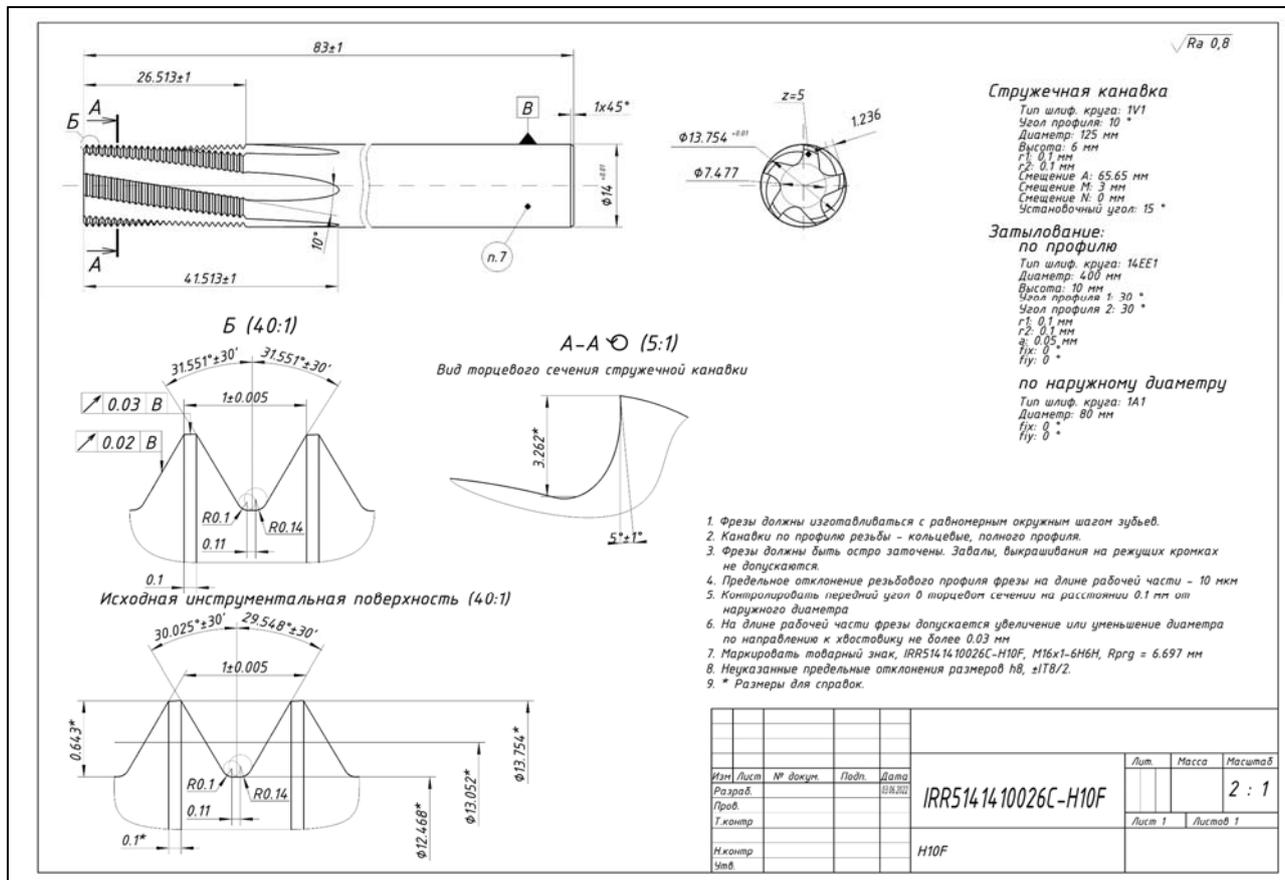


Рисунок 5. Пример рабочего чертежа резьбовой фрезы $\Phi 14$ мм, $P = 1$ мм.

Результаты работы СПРФ позволили выявить особенности конструкции резьбовой фрезы и формируемой этой фрезой резьбы, связанные с технологией изготовления инструмента на заточных станках с ЧПУ. Установлено, что исходная инструментальная поверхность имеет отклонение от прямолинейности боковых сторон профиля, вершины и впадины, а также угол наклона вершины и впадины, которые связаны с особенностями профилирования канавки и зубьев. Установлены погрешности получаемой резьбы, связанные с переносом погрешностей исходной инструментальной поверхности (ИИП), а также геометрической погрешности профиля резьбы из-за используемой кинематической схемы с параллельными осями резьбы и резьбовой фрезы (Рисунок 6). На разработанную систему проектирования получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021613537.

В пятой главе представлены результаты и анализ экспериментальных исследований составляющих силы резания и угла конусности резьбы при резьбофрезеровании. Экспериментальными исследованиями подтверждены расчётно-аналитические зависимости формообразования канавки и задней поверхности зубьев резьбовых фрез.

В результате эксперимента по исследованию силы резания при резьбофрезеровании получены зависимости, позволяющие рассчитать среднюю максимальную

составляющую силы резания ($\overline{F_{xy}^{max}}$, Н) для оценки прочности инструмента, а также угол конусности резьбы (θ_p , °) для оценки точности ее изготовления: $\overline{F_{xy}^{max}} = 1138,148S_z^{0,4743}$ ($R = 0,86$), $\overline{F_{xy}^{max}} = 3835,321d_p^{-0,928}$ ($R = -0,93$), $\overline{F_{xy}^{max}} = 122,889D^{0,4542}$ ($R = 0,67$), $\overline{F_{xy}^{max}} = 329,48P^{1,5971}$ ($R = 0,99$), $\overline{F_{xy}^{max}} = 133,8572l^{1,092}$ ($R = 0,98$), $\theta_p = \frac{1}{38462,655*S_z^2 - 4902,153*S_z + 160,434}$ ($R = 0,82$); $\theta_p = 0,442 - \frac{4,441}{D}$, ($R = -0,9$), $\theta_p = \frac{1}{0,07776061*l^2 - 2,909261*l + 30,76078}$ ($R = 0,45$). Угол конусности резьбы не превысил $0,893^\circ$, что в пересчете соответствует изменению диаметра резьбы на 16 мкм на 10 мм ее длины при обработке инструментом с диаметром рабочей части до 14 мм (для резьб с $D = 16 \dots 30$ мм), 6 степени точности, и находится в поле допуска изготавливаемой резьбы.

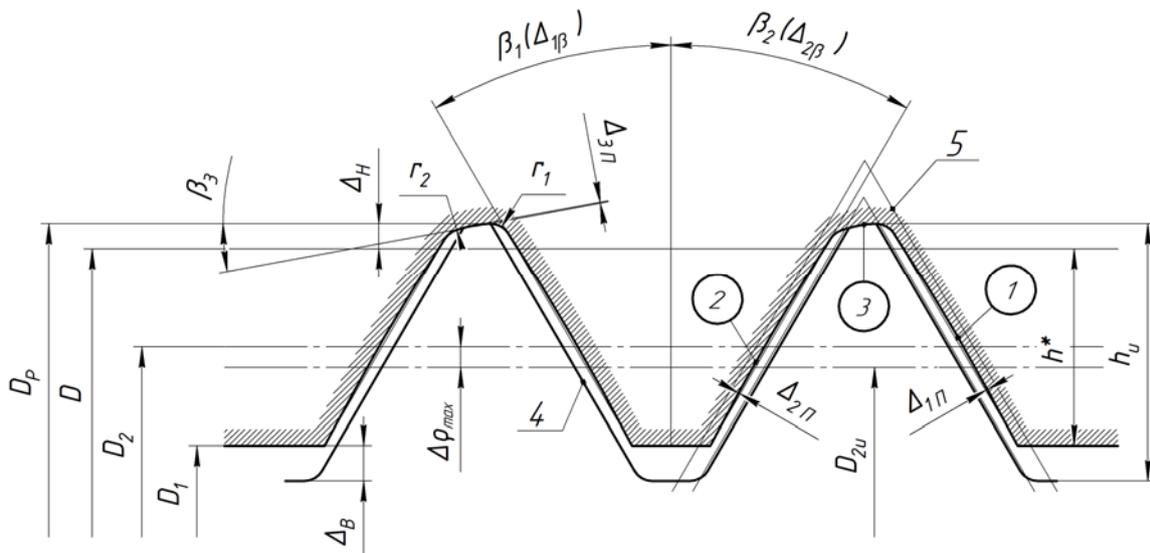


Рисунок 6. Формообразование резьбы на основе технологического подхода в СПРФ (D – номинальный диаметр резьбы; D_1 – внутренний диаметр резьбы; D_2 – средний диаметр резьбы; D_p – диаметр резьбы наружный; $D_{2и}$ – средний диаметр ИИП; $\Delta_B, \Delta\rho_{max}, \Delta_H$ – расстояния между радиусами ИИП и резьбы; $\Delta_{1п}, \Delta_{2п}, \Delta_{3п}$ – геометрические отклонения от прямолинейности сторон резьбового профиля 1,2,3; $\Delta_{1б}, \Delta_{2б}$ – отклонения от номинальных значений углов резьбового профиля β_1, β_2 ; r_1, r_2 – радиусы впадины резьбы; β_3 – угол наклона впадины резьбы; 4 – ИИП; 5 – поле допуска $\frac{TD_2}{2}$ формообразуемой резьбы).

Эксперимент по формообразованию канавки позволил подтвердить предложенную систему математических зависимостей для расчета профиля торцевого сечения канавки резьбовой фрезы на основе расчетной схемы, соответствующей кинематической схеме работы шлифовальных станков с ЧПУ. В результате сравнительного анализа показана сходимость полученных профилей, максимальное отклонение не превысило 0,42 мм по опорным концентричным окружностям при изготовлении канавок на заготовке диаметром 40 мм.

В результате эксперимента установлены взаимосвязи углов поворота шлифовального круга $\varphi_{x2}, \varphi_{y2}$ и углов резьбообразующего профиля зуба инструмента. Эксперимент по формообразованию задней поверхности зубьев резьбовых фрез

позволил подтвердить разработанные расчётно-аналитические зависимости, определяющие форму резбообразующего профиля.

В шестой главе представлена производственная апробация результатов работы. В разработанной СПРФ спроектирована и изготовлена на базе ФГУП «НПЦАП» (г. Москва) комбинированная гребенчатая резбовая фреза $\varnothing 2,2$ мм со сверлильной частью на торце (МЗ-6Н), изготовленная из твердого сплава. Подтверждена работоспособность разработанной конструкции резбовой фрезы, доказан экономический эффект внедрения, и эта конструкция внедрена в производственную программу ФГУП «НПЦАП».

Также в разработанной СПРФ спроектирована и изготовлена на базе ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» (г. Серпухов) резбовая фреза ТМ8х1,25-6-65 из твердого сплава $\varnothing 6$ мм для изготовления точных внутренних резьб (М8-4Н5Н) в заготовках из Д16Т и стали 40Х. Подтверждена работоспособность разработанной конструкции резбовой фрезы, и эта конструкция внедрена в производственную программу ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ».

Общие выводы по диссертации

1. Решена актуальная научно-техническая задача по разработке системы проектирования на основе системы обеспечения точности резьбы и предложен подход к проектированию конструкции концевой гребенчатой резбовой фрезы с учётом технологических возможностей шлифовально-заточных станков с ЧПУ, позволяющих реализовать конструкторские решения по изготовлению сложных форм стружечных канавок и формы резбообразующих профилей зубьев, а также проводить корректирование их параметров.

2. Разработана система проектирования резбовых фрез и алгоритм расчёта геометрических параметров гребенчатых резбовых фрез, позволяющие получить технологичную конструкцию инструмента с возможностью её оптимизации и автоматизированным формированием чертежа и рабочей документации.

3. Решена задача профилирования стружечных канавок при смещении и повороте шлифовального круга согласно кинематической схеме шлифовально-заточного станка с ЧПУ. Предложена математическая зависимость, определяющая профиль стружечной канавки, которая позволяет рассчитать ее параметры (диаметр сердцевинки, передний угол, центральный угол раскрытия, площадь) для формообразования резьбы заданного класса точности.

4. Обоснована возможность и предложен способ формообразования задней поверхности зубьев резбовых фрез шлифовальным кругом, повернутым на два угла. Предложена математическая зависимость для определения формы резбообразующего профиля зуба, что позволяет рассчитать его параметры для формообразования резьбы заданного класса точности.

5. Результаты исследования влияния исходных параметров инструмента (шага, диаметра рабочей части, угла наклона стружечной канавки, переднего и заднего углов в торцевом сечении) на геометрические параметры зуба позволили определить ограничения геометрических параметров резбовой фрезы, с учётом которых возможно проведение необходимой коррекции расчётных значений параметров в системе проектирования концевых гребенчатых резбовых фрез.

6. Разработаны экспериментальные зависимости силы резания от подачи на зуб, номинального диаметра, длины и шага резьбы, диаметра рабочей части инструмента, позволяющие проверить прочность элементов концевой гребенчатой резьбовой фрезы. Экспериментально установлено, что изменение диаметра рабочей части инструмента до 14 мм при обработке резьб с $D = 16 \dots 30$ мм обеспечивает конусность резьбы не превышающую 16 мкм на 10 мм длины резьбы, что существенно меньше ее поля допуска на средний диаметр.

7. Полученные результаты работы использованы ФГУП «НПЦАП» и ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» при разработке конструкций резьбовых фрез, которые показали свою работоспособность и внедрены в производственную программу.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Древаль А.Е., Мальков О.В., Павлюченков И.А., Виноградов Д.В. Определение диаметра резьбообразующей части резьбовых фрез. // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 74–87 (0,69 п.л./0,17 п.л.)

2. Мальков О.В., Павлюченков И.А., Козяр В.Н. Профилирование стружечных канавок резьбовых фрез // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2018. №3 (696). С. 3-13. (0,63 п.л./0,21 п.л.)

3. Мальков О.В., Павлюченков И.А., Смирнов А.А. Способ затылования резьбовых фрез // Вестник машиностроения. Издательство «Инновационное машиностроение». Москва. Электрон. журн. 2019. №2 (125). С. 83-101. (1,13 п.л./0,38 п.л.)

4. Мальков О.В., Павлюченков И.А., Силаев Р.В. Создание параметризованной геометрической модели резьбовой фрезы с винтовыми стружечными канавками в среде T-FLEX CAD // Проблемы машиностроения и автоматизации – 2019, №1, С.72-79. (0,5 п.л./0,17 п.л.)

5. Malkov O.V., Pavlyuchenkov I.A. Thread milling cutter flute production possibility research by using typical profiles grinding wheels // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019). Conference proceedings ICIE 2019. Ser. "Lecture Notes in Mechanical Engineering" – 2020, С.1089-1096. (0,5 п.л./0,25 п.л.)

6. Павлюченков И.А., Мальков О.В. Профилирование стружечных канавок резьбовых фрез // Студенческая научная весна 2013: Машиностроительные технологии: Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов. Москва. 2013. С. 1-2. (0,13 п.л./0,07 п.л.)

7. Мальков О.В., Павлюченков И.А. Моделирование стружечных канавок резьбовых фрез в программной среде ANCA ToolRoom // Технологическое обеспечение машиностроительных производств: Сборник научных трудов I Международной заочной научно-технической конференции. Челябинск, 2014. С. 560-565 (0,32 п.л./ 0,16 п.л.)

8. Мальков О.В., Павлюченков И.А. Исследование геометрических параметров зубьев резьбовых фрез с винтовыми стружечными канавками // Будущее машиностроения России: Седьмая Всероссийская конференция молодых ученых и

специалистов. Сборник трудов. - Москва, 24-27 сентября 2014 г. / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2014. - С. 13-14. (0,13 п.л./ 0,07 п.л.)

9. Павлюченков И.А., Мальков О.В. Конструкторская и технологическая подготовка производства резьбовой фрезы с винтовыми стружечными канавками на заточных станках с ЧПУ // Тезисы докладов XX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. Королёв, 2014. С. 352-353 (0,13 п.л./ 0,06 п.л.)

10. Павлюченков И.А., Мальков О.В. Профилирование винтовых канавок резьбовых фрез // Будущее машиностроения России: Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. С. 27-29. (0,13 п.л./ 0,06 п.л.)

11. Павлюченков И.А. Автоматизация проектирования резьбовых фрез // Будущее машиностроения России: Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов / Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019. С. 81-84. (0,25 п.л.)

12. Павлюченков И.А., Мальков О.В. Система автоматизированного проектирования концевых резьбовых фрез // Инновационные технологии реновации в машиностроении. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» – 2019, С. 316-319. (0,25 п.л./0,13 п.л.)

13. Павлюченков И.А., Черный А.И. Разработка программы автоматизированного черчения резьбовой фрезы // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского: сборник трудов – 2020, №1, С.82-86. (0,25 п.л./0,13 п.л.)

14. Павлюченков И.А., Глухов В.С., Мальков О.В. Моделирование резьбофрезерования // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского: сборник трудов – 2020, №1, С.32-36. (0,25 п.л./0,08 п.л.)

15. Пат. №2732871 Российская Федерация, МПК В23Р 15/34, В24В 5/36, В23F 5/02. Способ формообразования задней поверхности зубьев резьбовых фрез / О.В. Мальков, И.А. Павлюченков; заявитель и патентообладатель О.В. Мальков, И.А. Павлюченков. №2020101746; заявл. 17.01.2020; опубл. 24.09.2020 Бюл. №27.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018661176 Российская Федерация. Профилирование стружечных канавок цельных концевых резьбовых фрез / И.А. Павлюченков, О.В. Мальков; заявитель и правообладатель И.А. Павлюченков, О.В. Мальков. – №2018616913; заявл. 04.07.2018; опубл 04.09.2018. – 1 с.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021613537 Российская Федерация. Система автоматизированного проектирования концевых гребенчатых резьбовых фрез для обработки внутренней резьбы / И.А. Павлюченков, О.В. Мальков; заявитель и правообладатель И.А. Павлюченков, О.В. Мальков. – №2021612601; заявл. 24.02.2021; опубл 10.03.2021 – 1 с.