

На правах рукописи

УДК 621.99

Карельский Александр Сергеевич

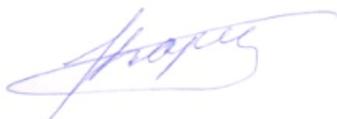
ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗЬБОФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
СНИЖЕНИЯ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИНСТРУМЕНТА И
ЗАГОТОВКИ

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: **Хлудов Сергей Яковлевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
технологии машиностроения ФГБОУ ВО
«Тульский государственный университет»
- Моргунов Юрий Алексеевич**
кандидат технических наук, профессор ка-
федры технологий и оборудования машино-
строения ФГАОУ ВО «Московский политехни-
ческий университет»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
"Рыбинский государственный авиационный
технический университет имени П.А. Соловь-
ева"

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. В современной промышленности практически все изделия представляют собой сборочные единицы, где одним из основных видов разъемных соединений является резьбовое соединение. Резьбофрезерование наиболее гибкий процесс, исключаяющий множество проблем, возникающих при обработке другими способами и не уступающий им по производительности. С переходом производств на станки с ЧПУ возросла и доля использования фрезерования резьб. Наряду с большим числом преимуществ резьбофрезерование обладает рядом недостатков, среди которых наличие конусности резьбы из-за использования кинематической схемы с параллельными осями резьбы и инструмента, что негативно сказывается на точности резьбы и требует дополнительных исследований. Производители режущего инструмента выделяют эту проблему, как основную для цельных гребенчатых резьбовых фрез, наиболее распространенных на производстве. Наличие конусности связано с изгибом инструмента под действием силы резания, поэтому возможность прогнозировать силу при резьбофрезеровании позволит минимизировать конусность резьбы, улучшить условия фрезерования и повысить точность резьбы. Анализ исследований по резьбофрезерованию позволил сформулировать условия, которые должны быть учтены при разработке модели силы резания при резьбофрезеровании, такие как условия косоугольного несвободного резания, наличие радиуса округления режущих кромок, радиального биения резьбообразующих профилей, неравномерного окружного шага зубьев фрезы и угла наклона стружечных канавок. Кроме того, разрабатываемая модель должна учитывать сложную форму срезаемого слоя, образуемую за счет фасонной режущей кромки и сложного движения инструмента. Прогнозирование конусности резьбы по такой модели силы резания позволит учитывать ее при определении геометрических параметров вновь разрабатываемого инструмента и назначении параметров режима резания для обеспечения резьбы требуемого класса точности, что является актуальной задачей в силу современной тенденции импортозамещения и ухода крупных зарубежных инструментальных компаний с российского рынка.

Цель работы – Повышение точности внутренних резьб при фрезеровании на основе исследования влияния силового воздействия инструмента и заготовки на конусность получаемой резьбы.

Основные задачи исследования:

1. Разработать теоретическую модель составляющих силы резания при резьбофрезеровании и исследовать влияние на силу резания геометрических параметров резьбовых фрез, формируемой резьбы и параметров режима резания.
2. Разработать математические зависимости для определения конусности резьбы, как показателя ее точности, с использованием моделирования силы резания при резьбофрезеровании гребенчатыми фрезами и определить значимые входные параметры для расчета конусности с целью достижения требуемой точности и возможного ее повышения.
3. Разработать критерий равномерности резьбофрезерования гребенчатыми фрезами для обеспечения возможности снижения величины силы резания.
4. Провести экспериментальные исследования для подтверждения

теоретической модели силы резания, регулирования ее величины и расчета конусности.

5. Разработать и внедрить научно-обоснованные рекомендации по назначению и расчету геометрических параметров гребенчатых резьбовых фрез и параметров режима резания.

Объект исследования – гребенчатые резьбовые фрезы, резьбофрезерование, сила резания, точность резьбы.

Предметная область – теоретическая модель силы резания при резьбофрезеровании однодисковыми и гребенчатыми резьбовыми фрезами, теоретические основы обеспечения точности при резьбофрезеровании.

Научная новизна

1. Предложена система расчета конусности резьбы с использованием моделирования силы резания, которая учитывает возникающую неравномерную нагрузку по углу контакта в условиях резьбофрезерования гребенчатыми фрезами и податливость инструментальной наладки.

2. Разработана и подтверждена теоретическая модель для расчета силы резания при резьбофрезеровании однодисковыми и гребенчатыми фрезами на основе расчета параметров срезаемого слоя, с учетом износа инструмента, радиуса округления режущих кромок, радиального биения и неравномерного углового шага зубьев инструмента.

3. Разработана и подтверждена теоретическая модель определения радиального и углового перемещения инструментальной наладки с учетом ее податливости, которая позволяет определить конусность внутренней резьбы и ее точность при обработке гребенчатыми фрезами с винтовыми стружечными канавками.

4. Предложено понятие критерия равномерности резьбофрезерования на основе расчета силы резания и площади сечения срезаемого слоя для уменьшения силы резания. Установлены зависимости влияния геометрических параметров инструмента на угол наклона стружечных канавок при условии равномерного резьбофрезерования.

Методы исследования и достоверность. Теоретические исследования проведены с использованием основных положений теории резания материалов, аналитической геометрии и теории сопротивления материалов. При планировании экспериментальных исследований использованы методы теории вероятности и математической статистики. Геометрические модели выполнялись и проверялись при помощи программы Autodesk Inventor 2018 и Компас-3D. Расчеты проводились в программе РТС Mathcad Prime 3.1. Достоверность результатов подтверждается сходимостью расчётных и экспериментальных результатов, апробацией результатов работы на спроектированных, изготовленных и испытанных опытных образцах концевых гребенчатых резьбовых фрез.

Практическая значимость работы

1. Предложена методика расчета радиального и углового перемещения инструментальной наладки с использованием моделирования силы резания при резьбофрезеровании гребенчатыми фрезами, которая позволила определить конусность и точность получаемой резьбы.

2. Предложена экспериментальная зависимость для определения силы

резания однодисковой резьбовой фрезой, позволяющая оценить максимальную нагрузку при обработке и использовать ее при переходе на конструкцию гребенчатой резьбовой фрезы.

3. Предложена зависимость для расчета угла наклона стружечных канавок, которая позволяет определить его при условии обеспечения равномерного резьбофрезерования с учетом влияния диаметра и шага резьбы, диаметра и длины рабочей части, числа зубьев резьбовой фрезы, а также подачи при обработке.

4. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по назначению и расчету геометрических параметров гребенчатых резьбовых фрез и процесса резьбофрезерования для обеспечения требуемого класса точности резьбы.

5. Проведена апробация разработанных рекомендаций на основе разработки и испытаний опытных образцов гребенчатых резьбовых фрез на предприятии ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» (г. Серпухов).

Апробация работы. Результаты были представлены на научно-технических конференциях: Всероссийская конференция молодых учёных и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016-2021); Всероссийская научно-техническая конференция студентов «Студенческая научная весна: Машиностроительные технологии» (Москва, 2016-2018); *7-th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021)* (Челябинск, 2021); 43 и 46 Академические чтения по космонавтике им. С.П. Королева (Москва, 2019 и 2021); Международная научно-техническая конференция, посвящённая 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» (Москва, 2019); Всероссийская научно-методическая конференция, посвящённая 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского (Москва, 2020); Международный конгресс «Моделирование сложных технических систем»: конференция «Моделирование в инженерном деле» (Москва, 2020).

По теме диссертационной работы получен грант РФФИ «Аспиранты» № 19-38-90220/19 от 30.08.2019 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 17 научных работ, в том числе 2 работы, входящих в перечень ВАК РФ, 3 работы, входящих в список изданий, рецензируемых в *SCOPUS*. Общий объем 2,42 п.л.

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

На защиту выносятся:

1. Система повышения точности внутренних резьб при фрезеровании на основе исследования влияния силового воздействия инструмента и заготовки на конусность получаемой резьбы с учетом податливости инструментальной наладки, включающая модель силы резания при резьбофрезеровании однодисковыми и гребенчатыми фрезами.

2. Методика расчета конусности внутренней резьбы для обеспечения и возможности повышения класса ее точности с использованием моделирования силы резания при резьбофрезеровании гребенчатыми фрезами с учетом износа инструмента, радиуса округления режущих кромок, радиального биения и неравномерного углового шага зубьев инструмента.

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 была спроектирована гребенчатая резьбовая фреза диаметром 6 мм для обработки внутренних резьб М8х1,25-4Н5Н, М10х1,25-6Н, М12х1,25-6Н в заготовках из стали 40Х и алюминиевого сплава Д16Т, опытные образцы которой были изготовлены на базе ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» (г. Серпухов). Инструменты прошли производственные испытания, показали свою работоспособность, обеспечили заданную точность изготовленных резьб и внедрены в производственную программу предприятия.

Результаты работы использованы в учебном процессе кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ имени Н.Э. Баумана в дисциплинах «Основы компьютерного проектирования», «Проектирование операций механической обработки» и «Компьютерное проектирование операций механической обработки» для студентов, обучающихся по специальностям 15.05.01 и 15.04.02.

Структура и объем работы. Работа включает в себя 5 глав, общие выводы, список использованной литературы из 120 наименований и приложения. Работа состоит из 249 страниц, в том числе 231 основного текста, 87 рисунков, 22 таблиц, а также приложения на 18 страницах.

Содержание работы

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

В первой главе представлен анализ области использования резьбофрезерования, рассмотрены исследования, посвященные фрезерованию резьбы и силе резания при резьбофрезеровании. Представлен анализ исследований силы резания при точении и фрезеровании и рассмотрены работы по равномерности фрезерования.

Анализ области использования резьбофрезерования показал перспективность процесса при изготовлении внутренних резьб в изделиях различных отраслей промышленности, которое наряду с большим числом преимуществ обладает рядом недостатков, среди которых наличие конусности резьбы из-за использования кинематической схемы с параллельными осями резьбы и инструмента, что требует дополнительных исследований. Установлено, что несовпадение диаметров резьбы и инструмента приводят к радиальному и угловому перемещению инструментальной наладки под действием силы резания и накладывает ограничения на ряд параметров процесса резьбофрезерования и используемого инструмента, что присуще цельным резьбовым фрезам, наиболее распространенным в производстве.

Вклад в исследование процесса фрезерования резьбы дисковыми и гребенчатыми фрезами внесли 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., Araujo A.C., Fromentin G., Poulachon G., Sharma V.S., Lee S.W. и др.

Анализ литературных источников выявил ограниченное количество информации по влиянию параметров процесса и инструмента на конусность получаемой резьбы, которое не позволяет учесть влияние этих параметров на точность резьбы.

Установлен ряд моделей расчета силы резания при резьбофрезеровании, которые различаются трудоемкостью расчетов, необходимостью проведения дополнительных экспериментальных исследований и не учитывающих полностью условия резьбофрезерования, что требует разработки теоретической модели силы при резьбофрезеровании с учетом указанных недостатков.

Проведенный анализ работ по резьбофрезерованию позволил сформировать условия, которые должны быть учтены при разработке модели силы резания при резьбофрезеровании, такие как условия косоугольного несвободного резания, наличие радиуса округления режущих кромок, радиальное биение и неравномерный окружной шаг зубьев фрезы, а также угол наклона стружечных канавок.

Проведен анализ существующих моделей по определению силы резания, который показал устойчивую связь между силой стружкообразования и параметрами срезаемого слоя. Вклад в изучение силы резания внесли Бобров В.Ф., Брикс А.А., Грановский Г.И., Грановский В.Г., Грубый С.В., Еремин А.Н., Зворыкин К.А., Зорев Н.Н., Лоладзе Т.Н., Полетика М.Ф., Полетаев В.А., Розенберг А.М., Розенберг Ю.А., Рыкунов А.Н., Силин С.С., Тахман С.И., Тиме И.А., Altintas Y., Constantin C., Kienzle O., Merchant M.E., Taylor F. и др. Рассмотрены основные подходы к определению теоретических зависимостей составляющих силы резания.

Для анализа параметров срезаемого слоя при резьбофрезеровании рассмотрены существующие модели срезаемого слоя, которые показали необходимость учета траектории винтового движения, в результате которого образуется несимметричный срезаемый слой сложной формы и увеличение угла контакта.

На основе работ по исследованию равномерности фрезерования (Аршинов В.А., Грановский Г.И., Кувшинский В.В.) выявлено, что для уменьшения максимальной силы резания необходимо работать в условиях равномерного фрезерования. Установлено, что используемые критерии равномерности фрезерования не подходят для резьбофрезерования, из-за фасонного профиля зуба фрезы, что требует разработки критерия равномерности резьбофрезерования для управления параметрами процесса и инструмента при его проектировании и эксплуатации.

Во второй главе представлены разработанные экспериментальные стенды необходимые для исследований силы резания при резьбофрезеровании и перемещений инструментальной наладки.

Для подтверждения расчетных зависимостей силы резания при резьбофрезеровании однодисковыми резьбовыми фрезами разработана инструментальная наладка на основе регулируемой расточной головки с использованием расточных резцов из твердого сплава ВК10. Разработан план эксперимента по определению зависимостей составляющих силы резания от номинального диаметра и шага резьбы, диаметра рабочей части инструмента, подачи на зуб и скорости резания, направления фрезерования и угла наклона вершины резьбообразующего профиля. Исследования проводились на координатно-расточном станке с ЧПУ модели 24K40CF4. Заготовки изготавливались из стали 45 на токарном станке модели

МК6056, фрезерном станке модели 6P12 и сверлильном станке модели 2Н135. Резцы изготавливались из прутков $\varnothing 6$ твердого сплава ВК10 на универсальном точном станке модели 3Д642Е. Для нарезания резьбы в заготовках изготавливались полуотверстия. Измерение составляющих силы резания производились при помощи контрольно-измерительного диагностического стенда на базе динамометра *Kistler 9257B*. Для контроля геометрических параметров резца и получаемой резьбы использовались универсальный измерительный микроскоп УИМ-21 и профилограф-профилометр модели 252.

При испытании опытных образцов резьбовых фрез точность резьбы оценивалась интегрально проходными и непроходными калибрами.

Для сравнения расчетных значений силы резания с экспериментальными была разработана методика по пересчету полученных составляющих силы резания в координатной системе динамометра – P_x , P_y в касательную P_t и радиальную P_r . Осевая составляющая P_z не пересчитывалась.

Для подтверждения расчетных параметров сечения срезаемого слоя была разработана параметризованная геометрическая модель в программе *Autodesk Inventor 2018* и составлен план расчетного эксперимента по определению зависимостей влияния входных параметров модели на форму и параметры срезаемого слоя при резьбофрезеровании.

Разработан измерительный стенд на базе трехкоординатного обрабатывающего центра модели *VM-2 LKM Corp* с использованием инструментальной наладки, включающей цанговый патрон *ER25 BT40* и резьбовую фрезу *Sandvik Coromant - R217.15 140100AC26N 1630*, для проверки расчета по определению смещений инструментальной наладки под действием нагружающей силы.

В третьей главе разработана система повышения точности получаемой резьбы за счет снижения деформации оси инструмента и инструментальной наладки под действием силы резания. Для исследования силы резания при резьбофрезеровании разработана расчетная модель силы для однодисковых и гребенчатых резьбовых фрез и предложен расчет критерия равномерности.

Разработана расчетная схема (Рисунок 1) и решена задача определения конусности формообразуемой резьбы для достижения и возможного повышения ее точности с учетом радиального и углового перемещений инструментальной наладки с резьбовой фрезой под действием силы резания.

Получены зависимости определяющие предельное положение профиля полученной резьбы и предложен расчет максимального радиального $\Delta f_{нр}$ и углового φ_k перемещений инструментальной наладки с резьбовой фрезой с использованием распределения нагружающей силы на каждый резьбообразующий профиль в соответствии с его положением на винтовом зубе гребенчатой резьбовой фрезы, что позволяет решить задачу определения конусности для обеспечения точности получаемой резьбы по формуле:

$$c = 2 \cdot \frac{\Delta f_a - \Delta f_b}{l} \quad (1)$$

Предложено условие для обеспечения расположения получаемой искаженной резьбы внутри поля допуска для определенной степени точности:

$$\Delta f_{max} = \Delta f_a - \Delta f_b + \Delta \varphi_a + \Delta \varphi_b < \frac{TD_2}{2} \quad (2)$$

На основе расчетных параметров смещений предложена зависимость для расчета программируемого радиуса R_{PRG} фрезы, используемого при программировании операции на станке с ЧПУ. Для получения резьбы требуемого класса точности (Рисунок 1) при условии выполнения неравенства (2) предложено определять программируемый радиус фрезы R_{PRG} с учетом геометрической погрешности профиля резьбы $\Delta\rho_{max}$ при движении фрезы по сложной траектории:

$$R_{PRG} = \frac{d_p}{2} - \frac{a_{pmax} - l_f}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2}\right)} + \Delta\rho_{max} - \Delta f_{max} \quad (3)$$

На представленной схеме резьбовая гребенчатая фреза нагружалась равнодействующей составляющей силы резания P_{xy} на каждом резьбообразующем профиле, которая определялась в торцевом сечении из проекций касательной P_t и радиальной P_r составляющих с учетом винтового зуба фрезы и разных значений силы резания по углу контакта в каждый момент времени.

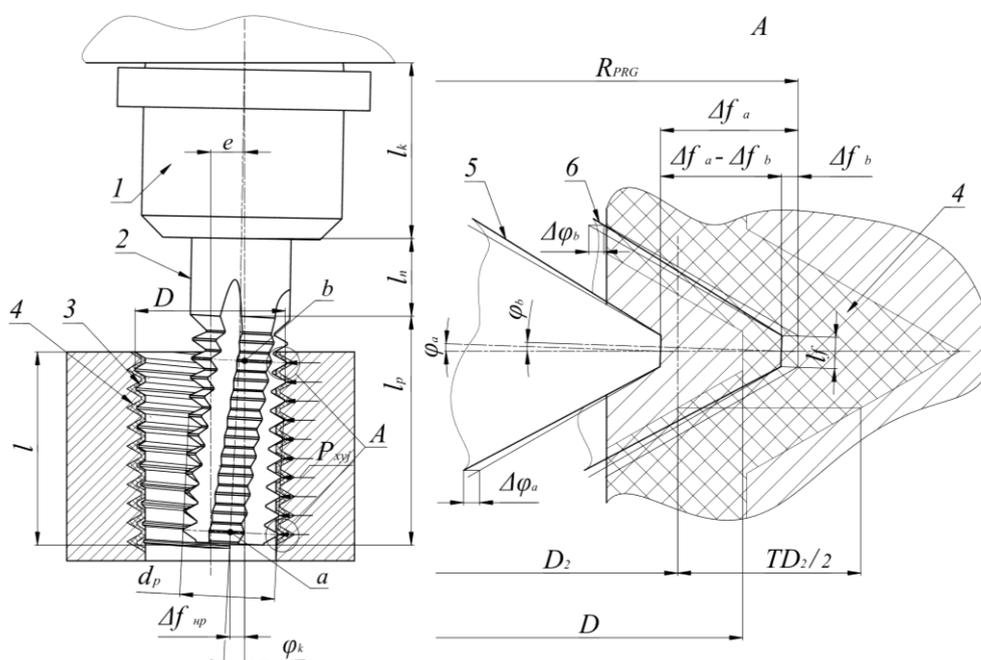


Рисунок 1. Расчетная схема определения радиального и углового перемещений инструментальной наладки (1 – цанговый патрон, 2 – резьбовая фреза, 3 – получаемая резьба, 4 – поле допуска резьбы, 5 – искажение профиля резьбы на длине резьбы в точке a , 6 – искажение профиля резьбы в начале резьбы в точке b)

Предложена система расчета конусности резьбы на основе моделирования силы резания при резьбофрезеровании, учитывающая параметры резьбы, инструмента, инструментальной наладки и параметров режима резания (Рисунок 2). Кроме того, система расчета силы позволяет проводить коррекцию силы резания для достижения требуемого класса точности резьбы, а также позволяет управлять постоянством силы для обеспечения равномерного фрезерования резьбы.

Для расчета составляющих силы резания использована модель Боброва В.Ф. при точении резьбы резцами, которая была изменена согласно специфике процесса фрезерования с учетом геометрических особенностей резьбовых фрез (Рисунок 3). Предложена система математических зависимостей для расчета составляющих силы резания при резьбофрезеровании.

Расчет по полученным формулам учитывает распределение силы по

передней поверхности на нормальную составляющую на боковых сторонах и вершине резбообразующего профиля соответственно (N_1, N_2, N_3) и касательную составляющую (F_1, F_2, F_3) и по задней поверхности на нормальную составляющую силы (N'_1, N'_2, N'_3) и касательную составляющую силы (F'_1, F'_2, F'_3). Такое распределение учитывает различие углов на каждой части резбообразующего профиля характеризует условие несвободного косоугольного резания.



Рисунок 2. Система расчета конусности резьбы с использованием моделирования силы резания при резбофрезеровании

Для определения составляющих силы по предложенной модели были разработаны зависимости для определения параметров срезаемого слоя при резбобфрезеровании и геометрических параметров резбообразующего профиля резбовых фрез.

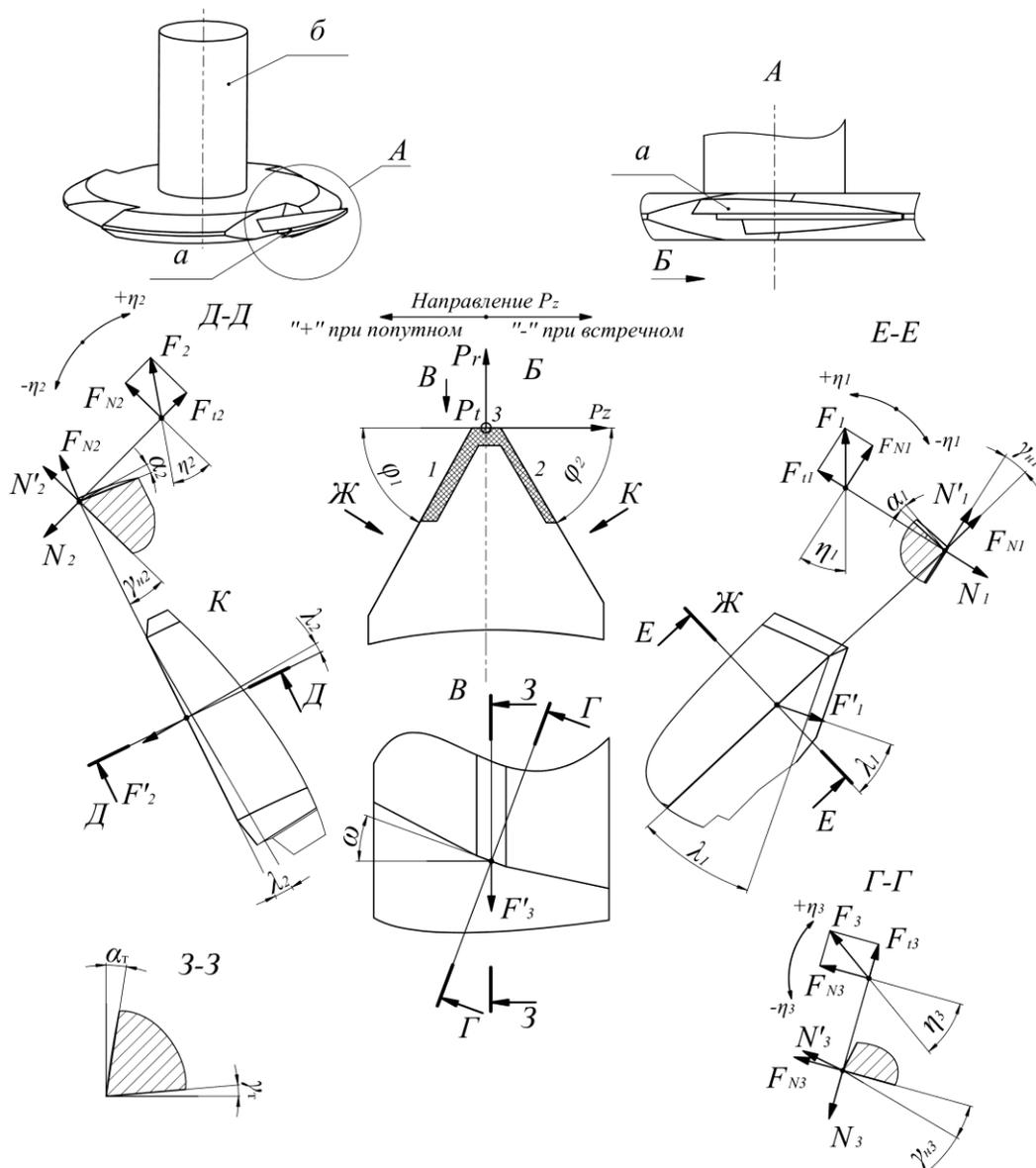


Рисунок 3. Модель расчета составляющих силы резания на резбообразующей части однодисковой фрезы при попутном и встречном направлении обработки (а – срезаемый слой, б – фреза дисковая; 1,2 – боковые стороны резбообразующего профиля, 3 – вершина резбообразующего профиля)

Предварительный проверочный расчет показал, что для условий, возникающих при резбобфрезеровании, наиболее близкие к экспериментальным данным результаты показала модель Рыкунова А.Н. для определения составляющих силы на передних и задних поверхностях фрезы через силу стружкообразования. Используемая последовательность определения составляющих силы резания была доработана с учетом радиального биения инструмента и износа по задней поверхности.

На основе предложенных зависимостей разработана программа «Расчет составляющих силы резания при резбобфрезеровании» в PTC Mathcad Prime 3.1. Для перехода на гребенчатые фрезы был разработан способ определения угловой

координаты резьбообразующих профилей внутри угла контакта с учетом работы нескольких зубьев, неравномерного окружного шага и погрешности углового шага между зубьями. Для сравнения расчетных значений составляющих силы резания с экспериментальными значениями была разработана последовательность пересчета касательной P_t и радиальной P_r , составляющей в равнодействующую P_{xy} через проецирование их на соответствующие оси, что позволило учесть несколько одновременно работающих зубьев.

Полученные результаты расчета составляющих силы резания для гребенчатой фрезы при работе нескольких зубьев в контакте, а также площади сечения на каждом резьбообразующем профиле фрезы показали, что при определенных геометрических параметрах резьбовой фрезы возможно уменьшить силу резания и достичь постоянства силы резания и постоянства площади сечения срезаемого слоя при резьбофрезеровании. На основании этого было определено понятие критерия равномерности резьбофрезерования (4), как относительного изменения равнодействующей составляющей силы резания P_{xy} и площади сечения срезаемого слоя f_{Σ} для уменьшения максимальной силы резания и достижения условия равномерного фрезерования:

$$\Delta = \frac{P_{xy\max} - P_{xy\min}}{P_{xy\max}} \cdot 100\% \approx \frac{f_{\Sigma\max} - f_{\Sigma\min}}{f_{\Sigma\max}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Проверочные расчеты показали, что различие результатов расчета Δ по площади не превышает 5% по сравнению с силой резания. В связи с этим возможно определять коэффициент равномерности резьбофрезерования по площади сечения срезаемого слоя, что значительно ускоряет расчет, без потери точности.

В четвертой главе приведено сравнение расчетных значений составляющих силы резания для однодисковой и гребенчатой фрезы, конусности получаемой резьбы с экспериментальными. Представлен расчет критерия равномерности резьбофрезерования и приведено исследование влияния параметров модели на угол наклона винтовых стружечных канавок при достижении условия равномерного резьбофрезерования.

Представлены результаты эксперимента по фрезерованию резьбы разработанной инструментальной наладкой на основе регулируемой расточной головки с использованием расточных резцов, который моделировал работу однодисковой резьбовой фрезы. Измеренные значения составляющих силы резания P_x, P_y, P_z были переведены в P_t, P_r, P_z и сравнивались с расчетными значениями (Рисунок 4), что показало схожесть тенденций изменения экспериментальных и расчетных значений силы резания.

На основании полученных экспериментальных данных разработаны общие и частные зависимости влияния подачи на зуб S_z , скорости резания V , диаметра резьбы D , шага резьбы P , диаметра рабочей части инструмента d_p и угла наклона передней поверхности ω на касательную P_t , радиальную P_r и осевую P_z составляющие силы резания. На всей области планирования эксперимента были получены расчетные значения составляющих силы и произведено их сравнение с экспериментальными (Рисунок 5).

Максимальное расхождение результатов по всему эксперименту для касательной и радиальной составляющих силы резания составило не более 6%, а по

осевой составляющей - 15%, что позволяет сделать вывод о работоспособности предложенной последовательности расчета силы для однодисковой фрезы и возможном ее использовании для расчета силы резания для гребенчатых фрез.

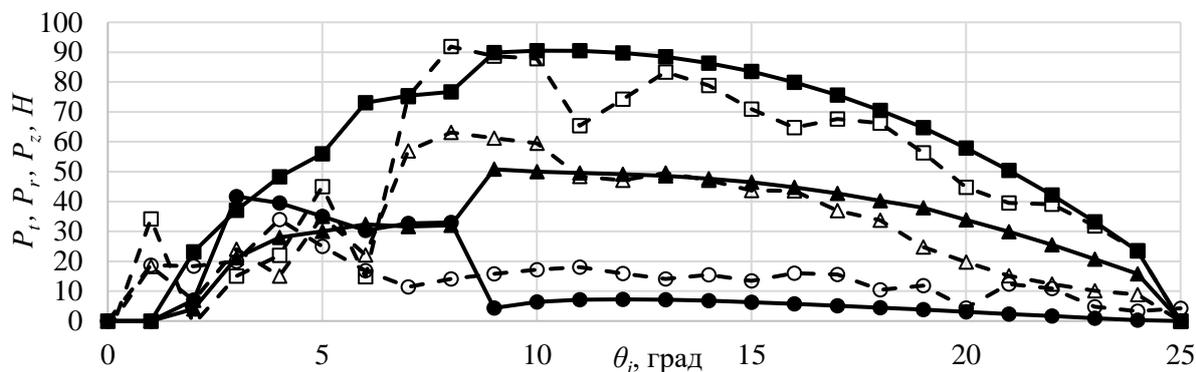


Рисунок 4. Сравнение экспериментальных $P_r(\square)$, $P_f(\Delta)$, $P_z(\circ)$ и расчетных $P_r(\blacksquare)$, $P_f(\blacktriangle)$, $P_z(\bullet)$ составляющих силы резания вдоль угла контакта ($D = 68$ мм, $P = 2$ мм, $D_l = 66$ мм, $d_p = 48$ мм, $l_f = 0,29$ мм, $\omega = 0^\circ$, $\gamma_r = 10^\circ$, $\alpha_r = 5^\circ$, $\rho_1 = 0,015$ мм; $\rho_2 = 0,015$ мм; $\rho_3 = 0,022$ мм; $z = 1$; $h_{31} = 0,07$ мм; $h_{32} = 0,07$ мм; $h_{33} = 0,08$ мм, $V = 90$ м/мин, $S_z = 0,12$ мм/зуб)

Для подтверждения результатов расчета программы по определению составляющих силы резания при обработке гребенчатой фрезой были использованы экспериментальные данные, полученные при проведении исследования влияния режимных параметров и геометрических параметров гребенчатых резбовых фрез на силу резания в учебном центре ООО «Сандвик» и для сравнения с расчетными данными была выбрана равнодействующая составляющая P_{xy} (Рисунок 6). Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных значений по всему эксперименту не превысило 10%, а законы изменения равнодействующей составляющей силы резания подтвердили совпадение с графиками зависимостей изменения составляющих силы резания для однодисковых фрез, что позволяет сделать вывод о том, что предложенная концепция анализа гребенчатых резбовых фрез на однодисковые полностью описывает условия резбофрезерования.

Для проверки последовательности расчета максимальной конусности при резбофрезеровании проведен эксперимент по определению перемещений инструментальной наладки, который подтвердил правильность выбранных значений податливости наладки и предложенного расчета конусности.

Разработанная последовательность расчета для определения значения максимальной конусности была проверена экспериментальными значениями конусности (Рисунок 6, д, е).

Анализ результатов показал, что расчетные значения конусности являются максимальными и описывают ее связь с силой резания. Экспериментальные значения не превышают предельные расчетные, что показывает работоспособность представленного расчета конусности. Используемые для расчета конусности параметры перемещения оси фрезы использовались для определения расположения профиля получаемой резьбы внутри поля допуска резьбы согласно принятому условию обеспечения точности (2). В случае неудовлетворительной точности резьбы

вносились изменения в параметры резбовой фрезы, инструментальной наладки и режима резания для уменьшения силы и обеспечения требуемой точности.

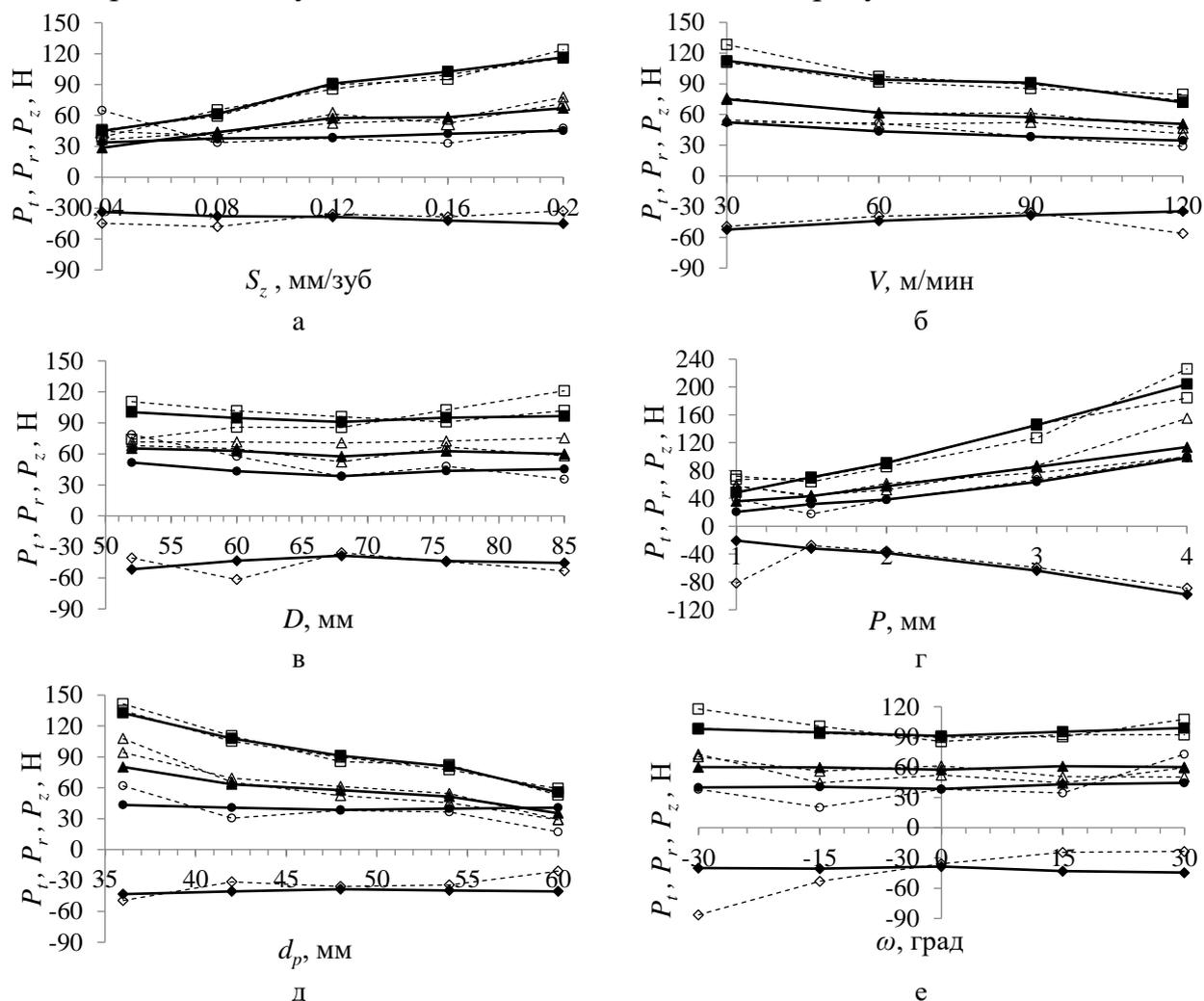


Рисунок 5. Графики расчетных зависимостей (P_t (■), P_r (▲), для попутного - P_z (●) и для встречного P_z (◆)) и экспериментальных зависимостей (P_t (□), P_r (△), для попутного - P_z (○), для встречного - P_z (◇)) составляющих силы резания от: подачи S_z (а), скорости резания V (б), диаметра резьбы D (в), шага резьбы P (г), диаметра рабочей части инструмента d_p (д) и угла наклона передней поверхности ω (е) ($D = 68$ мм, $P = 2$ мм, $D_1 = 66$ мм, $d_p = 48$ мм, $l_f = 0,29$ мм, $\omega = 0^\circ$, $\gamma_T = 10^\circ$, $\alpha_T = 5^\circ$, $\rho_1 = 0,015$ мм; $\rho_2 = 0,015$ мм; $\rho_3 = 0,022$ мм; $h_{31} = 0,07$ мм; $h_{32} = 0,07$ мм; $h_{33} = 0,08$ мм, $z = 1$, $V = 90$ м/мин, $S_z = 0,12$ мм/зуб)

Рассчитанное значение предельной конусности c позволяет сделать вывод о точности получаемой резьбы путем сравнения максимального смещения Δf_{max} , рассчитанного по формуле (2) для данного значения конусности с половиной поля допуска на номинальный средний диаметр резьбы ($T_{D2}/2$).

Проведено исследование по определению угла наклона стружечных канавок ω гребенчатой резбовой фрезы $\phi 6$ ($z = 3$) для обработки точной резьбы М8-4Н5Н резбовыми фрезами из условия равномерного резбофрезерования и установлено, что минимальные значения Δ достигаются при значениях $\omega = 27^\circ$ и $\omega = 48^\circ$ (Рисунок 7), при этом максимальная сила резания уменьшается в 2,5...3 раза. Для проектируемого инструмента было выбрано значение $\omega = 27^\circ$, поскольку угол $\omega = 48^\circ$

приводит к получению нетехнологичной конструкции резбовой фрезы.

Для разработки рекомендаций по назначению угла наклона ω получены частные и предложена общая зависимость по определению угла ω для гребенчатых резбовых фрез при условии равномерного резбофрезерования:

$$\omega = 131,848 \cdot e^{0,0014 \cdot d_p^2 - 0,0253 \cdot d_p} \cdot D^{0,965} \cdot 1,078^P \cdot z^{-0,866} \cdot l_p^{-0,929} \cdot 0,789^{S_z} \quad (5)$$

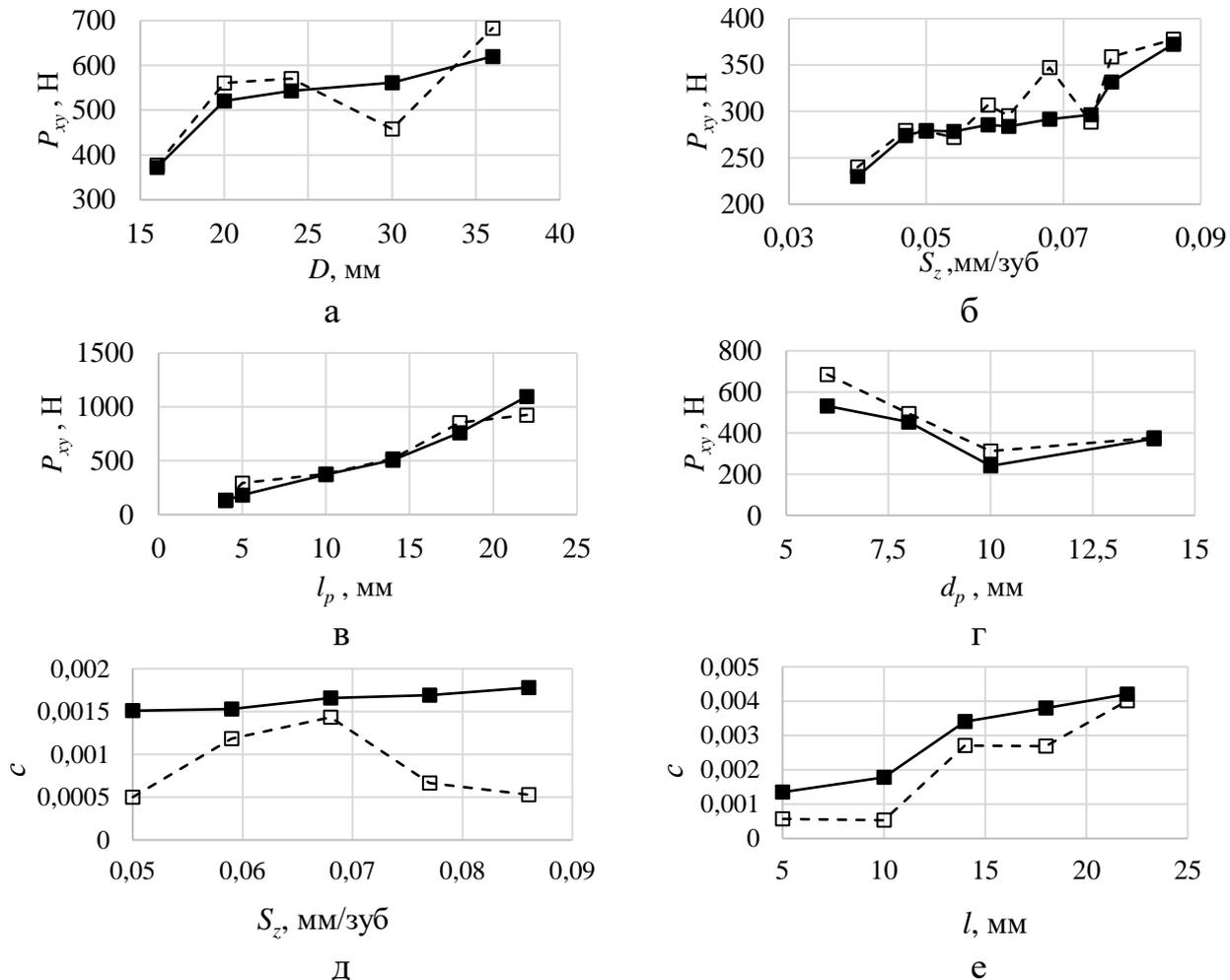


Рисунок 6. Графики зависимостей силы резания P_{xy} от исходных параметров (D (а); S_z (б); l_p (в); d_p (г)) и конусности от параметров (S_z (д); l (е)) для экспериментальных (\square) и расчетных (\blacksquare) значений ($d_p = 14$ мм; $D = 16$ мм; $P = 1$ мм; $S_z = 0,1$ мм/зуб; $V = 120$ м/мин; $l_f = 0,1$ мм; $\gamma_T = 10^\circ$; $\alpha_T = 9^\circ$; $h_3 = 0,08$ мм; $\rho = 0,01$ мм; $\Delta h = 0$; $\omega = 10^\circ$; $z = 5$; $l_p = 10$ мм; $\Delta \tau = 0^\circ$; направление резбофрезерования: встречное)

В пятой главе разработаны рекомендации по определению параметров резбовой фрезы и режима резания при прогнозировании конусности для достижения требуемого класса точности резьбы на примере расчета параметров резбовой фрезы из твердого сплава $\Phi 6$ мм для изготовления точной внутренней резьбы (М8х1,25-4Н5Н) и резьб средней точности (М10х1,25-6Н, М12х1,25-6Н) одним инструментом в заготовках из Д16Т и стали 40Х.

Для разрабатываемой резбовой фрезы проведено расчетное исследование при котором по предложенным рекомендациям были установлены диапазоны изменения параметров l_f , S_z , V , l , Δh , $\Delta \tau$, h_3 и длина вылета фрезы до режущей части l_n , для которых посчитано максимальное смещение Δf_{max} , которое сравнивалось с половиной величины поля допуска для требуемых резьб и внутри диапазонов

выбраны рекомендуемые параметры для достижения требуемой точности. На основе проведенного исследования была определена предельная длина рабочей части фрезы $l_p = 14,337$ мм для длины резьбы 14 мм, максимальное смещение при этом $\Delta f_{max} = 43$ мкм, что соответствует степени точности 4 по ГОСТ 16093-2004.

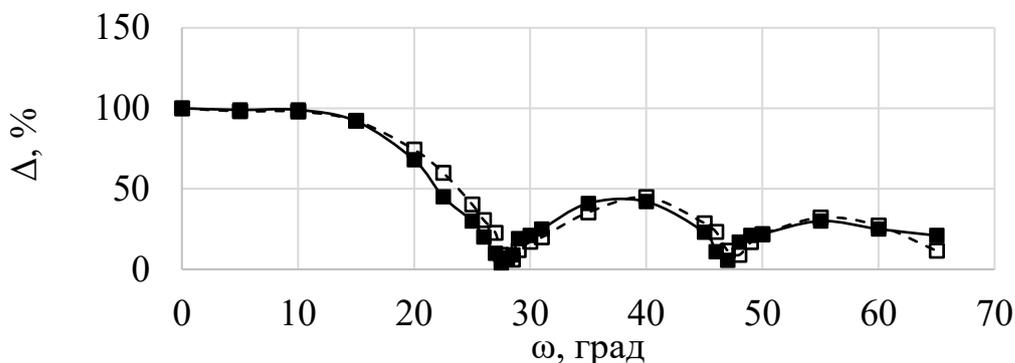


Рисунок 7. График зависимости изменения критерия равномерности Δ по равнодействующей составляющей силы резания P_{xy} (□) и площади сечения срезаемого слоя f_{Σ} (■) от угла ω ($d_p = 6$ мм; $D = 8$ мм; $P = 1,25$ мм; $S_z = 0,05$ мм/зуб; $V = 40$ м/мин; $l_f = 0,07$ мм; $\gamma_T = 7^\circ$; $\alpha_T = 9^\circ$; $h_3 = 0$ мм; $\rho = 0,01$ мм; $\Delta h = 0$; $z = 3$; $l_p = 16$ мм; $\Delta\tau = 0^\circ$; направление резьбофрезерования: попутное)

На основании рекомендаций был разработан чертеж фрезы, опытные образцы которой были изготовлены на базе ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» (г. Серпухов). Проведены производственные испытания, которые подтвердили работоспособность разработанной конструкции резьбовой фрезы, что позволяет сделать вывод о работоспособности системы расчета конусности резьбы для обеспечения и возможности повышения ее точности. Разработанная фреза внедрена в производственную программу ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ».

Общие выводы по диссертации

1. Решена актуальная научно-техническая задача по определению геометрических и конструктивных параметров резьбовых фрез и параметров процесса резьбофрезерования для обеспечения требуемого класса точности получаемой резьбы на основании разработанных аналитических и экспериментальных моделей расчета составляющих силы резания и конусности резьбы.

2. Разработана и экспериментально подтверждена теоретическая модель расчета составляющих силы резания при резьбофрезеровании. Для однодисковых резьбовых фрез учитываются параметры нарезаемой резьбы, геометрические параметры инструмента, радиусы округления режущих кромок, радиальное биение резьбообразующих профилей, неравномерный окружной шаг зубьев фрезы и параметры режима обработки. Для гребенчатых резьбовых фрез к вышеописанным параметрам добавляются угол наклона стружечных канавок и длина рабочей части.

3. Силовое взаимодействие инструмента и заготовки приводит к радиальному и угловому перемещению инструментальной наладки, которое влияет на класс точности получаемой резьбы. Установлена последовательность расчета максимального значения конусности резьбы при резьбофрезеровании гребенчатыми фрезами с учетом значения действующей силы и податливости инструментальной наладки на примере использования цангового патрона для обеспечения и возможности

повышения класса точности резьбы.

4. Доказана возможность достижения минимального значения суммарной силы в торцевом сечении инструмента с минимальным отклонением от среднего значения, что принято за условие равномерного резьбофрезерования и может служить инструментом для уменьшения до трех раз силы при резьбофрезеровании для достижения принятой степени точности резьбы.

5. Предложена расчетно-аналитическая зависимость для определения угла наклона стружечных канавок гребенчатой резьбовой фрезы от диаметра и длины резьбообразующей части инструмента, диаметра и шага резьбы, числа зубьев и подачи на зуб при условии равномерного резьбофрезерования.

6. На основании разработанных моделей расчета силы резания и конусности резьбы при резьбофрезеровании предложена методика определения геометрических параметров гребенчатых фрез и параметров режима резания для получения резьбы требуемого класса точности.

7. Разработанные рекомендации по определению параметров резьбовых фрез и параметров режима резания использованы ООО «СПЕЦИНСТРУМЕНТ» при разработке опытных образцов гребенчатой резьбовой фрезы для изготовления точной резьбы, которая показала свою работоспособность и внедрена в производственную программу.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Мальков О.В., Карельский А.С. Моделирование срезаемого слоя при резьбофрезеровании. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. №9 (690). С. 54-64. (0,63 п.л./0,31 п.л.)
2. Мальков О.В., Головки И.М., Карельский А.С. Теоретический расчет параметров сечения срезаемого слоя при резьбофрезеровании. // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2018. №10 (703). С. 24-36. (0,75 п.л./0,25 п.л.)
3. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Rising the work uniformity of thread milling cutters machining parts of rocket and space technology // Proceedings of XLIII ACADEMIC SPACE CONFERENCE: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration. AIP Conference proceedings – 2019, C.200005. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
4. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Study of thread milling cutter chip flutes inclination angle based on condition of thread milling uniformity// Proceedings of "Modeling in Engineering 2020". AIP Conference proceedings – 2022, C.040002. (0,5 п.л./0,25 п.л.)
5. Malkov O.V., Karelskiy A.S. Cutting force analysis during thread milling // Proceedings of the 7th international conference on industrial engineering (ICIE 2021). Conference proceedings ICIE 2021. Сер. "Lecture Notes in Mechanical Engineering" – 2022, C.563-573. (0,63 п.л./0,31 п.л.)
6. Головки И.М., Карельский А.С., Мальков О.В. Математическое моделирование срезаемого слоя при резьбофрезеровании // Будущее машиностроения России: Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2016. - С. 17-20. (0,18 п.л./ 0,06 п.л.)
7. Карельский А.С., Мальков О.В., Малькова Л.Д. Исследование сечения

срезаемого слоя при резбифрезеровании // Студенческая научная весна 2016: Машиностроительные технологии: Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов. Москва. 2016. С. 1-2. (0,13 п.л./0,04 п.л.)

8. **Карельский А.С.** Исследование геометрических параметров резбовых фрез с винтовыми стружечными канавками // Будущее машиностроения России: Десятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2017. - С. 6-8. (0,18 п.л./ 0,18 п.л.)

9. **Карельский А.С.,** Солдатов Ю.А. Моделирование резбифрезерования// Студенческая научная весна 2017: Машиностроительные технологии: Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов. Москва. 2017. С. 58-59. (0,13 п.л./0,06 п.л.)

10. Соловьев Н.И., **Карельский А.С.,** Мальков О.В. Оценка удельной силы при резбифрезеровании // Будущее машиностроения России: Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. - С. 28-32. (0,25 п.л./ 0,08 п.л.)

11. **Карельский А.С.,** Мальков О.В. Определение равномерности резбифрезерования // Будущее машиностроения России: Одиннадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018. - С. 19-22. (0,18 п.л./ 0,09 п.л.)

12. **Карельский А.С.** Анализ механики процесса резбифрезерования // Будущее машиностроения России: Двенадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2019. - С. 62-63. (0,13 п.л./ 0,13 п.л.)

13. **Карельский А.С.,** Мальков О.В. Моделирование резбифрезерования // Инновационные технологии реновации в машиностроении. Сборник трудов Международной научно-технической конференции, посвящённой 150-летию факультета «Машиностроительные технологии» и кафедры «Технологии обработки материалов» – 2019, С. 301-304. (0,18 п.л./0,09 п.л.)

14. Соловьев Н.И., **Карельский А.С.,** Исследование силы при резбифрезеровании // Студенческая научная весна 2019: Машиностроительные технологии: Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов. Москва. 2019. (0,18 п.л./0,09 п.л.)

15. **Карельский А.С.,** Соловьев Н.И., Мальков О.В. Сила резания при резбифрезеровании // Будущее машиностроения России: Тринадцатая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов. Сборник трудов. - М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2020. - С. 8-11. (0,18 п.л./ 0,06 п.л.)

16. Митюрязев А.Г, **Карельский А.С.,** Мальков О.В. Использование сборной резбовой фрезы для оценки критерия равномерности резбифрезерования // Всероссийская научно-методическая конференция, посвященная 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского: сборник трудов – 2020, №1, С.67-71. (0,25 п.л./0,08 п.л.)

17. Мальков О.В., **Карельский А.С.** Моделирование силы резания при резбифрезеровании // XLV академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых - пионеров освоения космического пространства: сборник трудов – 2021, С.108-111. (0,18 п.л./0,09 п.л.)