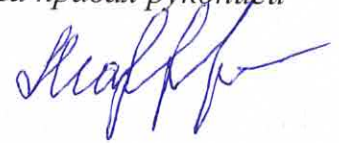


На правах рукописи



Леквеишвили Мария Анатольевна

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КОНЦЕВЫХ ФРЕЗ ПУТЕМ РАСЧЕТНО-
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБОСНОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА

Специальность:

2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической
обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир 2024

Работа выполнена в Научно-образовательном центре внедрения лазерных технологий (НОЦ ВЛТ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ).

Научный руководитель: **Давыдов Николай Николаевич**, доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НОЦ ВЛТ ВлГУ, г. Владимир.

Официальные оппоненты: **Михайлов Станислав Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика, микропроцессорная техника и технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Костромской государственный университет», г. Кострома.

Киселев Игорь Алексеевич, доктор технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», г. Иваново.

Защита состоится «2» октября 2024 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.03 при ВлГУ по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, корпус 1, ауд. 335.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ВлГУ и на сайте <http://diss.vlsu.ru/>.

Автореферат разослан «5» августа 2024 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, необходимо направить по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, кафедра ТМС, Жданову А. В.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

А. В. Жданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Достижения современного материаловедения определяют необходимость совершенствования не только конструкции режущего инструмента, но и методов и средств моделирования, а также расчетно-аналитического проектирования, методического обеспечения и информационно-технологического сопровождения процессов модернизации рабочего инструмента. Повышение эффективности механической обработки за счет сокращения оперативного времени и увеличения износостойкости инструмента возможно при корректном назначении геометрических параметров режущей части.

Экспериментальный подход является одним из основных и надежных методов при назначении геометрических параметров режущей части инструмента. Однако экспериментальные исследования требуют значительных материальных и временных затрат на подготовку и выполнение работ.

Существенное снижение продолжительности и повышение информативности результатов расчета достигается использованием моделей, основанных на уравнениях, описывающих процессы механической деформации материала обрабатываемой заготовки. Применение моделей и разработанных на их основе методик и алгоритмов определяют возможность прогнозирования силы резания и мощности привода станка, технологических параметров обработки и геометрических параметров режущей части инструмента. В связи с этим создание более эффективного рабочего инструмента посредством обоснованного выбора геометрических параметров режущей части является важной и актуальной задачей, представляющей как научный, так и практический интерес.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, Госзадание ВлГУ).

Степень разработанности темы исследования. Особый вклад в развитие теоретических основ резания металла, моделирования и экспериментального

исследования технологических процессов механической обработки заготовок внесли советские и российские ученые и их ученики И. А. Тиме, К. А. Зворыкин, А. А. Брикс, А. М. Розенберг, Н. Н. Зорев, С. С. Силин, Ю. А. Цеханов, В. С. Кушнер, Л. Д. Оленин, А. Л. Воронцов, С. В. Михайлов, И. А. Киселев, а также такие зарубежные авторы методов и средств механической обработки, как М. Е. Merchant, Р. L. В. Oxley, Y. Altintas, A. G. Atkins, E. H. Lee, B. W. Shaffer, K. Ocushima, K. Hitomi, P. Albrecht и др. При этом необходимым условием успешного развития теоретических основ механической обработки изделий машиностроения является изучение и применение методов физико-математического моделирования и экспериментального исследования процессов преобразования заготовок с использованием передовых достижений информационных технологий.

Объектом исследования являются современные технические и технологические решения рабочего инструмента, предназначенного для механической обработки пластичных металлов.

Предмет исследования – методы проектирования, моделирования и создания рабочего режущего инструмента для механической обработки пластичных металлов.

Цель работы: совершенствование методики расчетно-аналитического и экспериментального исследования геометрических параметров режущей части торцовых и винтовых зубьев при проектировании износостойких цельных концевых фрез, предназначенных для механической обработки пластичных металлических материалов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **задачи:**

1) Выполнить анализ методов и средств определения геометрических параметров режущей части рабочего инструмента при проектировании цельной концевой фрезы и изучить физико-механические свойства пластичных металлических материалов.

2) Исследовать схемы и режимы резания пластичных металлов вращающимся инструментом – концевой фрезой.

3) Разработать методику оценки силовых параметров процесса резания пластичных металлических материалов концевыми фрезами.

4) Разработать средства алгоритмического и программного обеспечения методики расчета геометрических параметров режущей части зубьев концевой фрезы.

5) Выполнить сравнительные испытания износостойкости модернизированных концевых фрез для титанового сплава ВТ6 в опытно-экспериментальном производстве.

Соответствие паспорту специальности - содержание диссертации соответствует пунктам 1, 2, 4 и 6 Паспорта 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Научная новизна результатов решения поставленных задач:

1) Разработана расчетно-экспериментальная методика определения силовых параметров резания концевыми фрезами, учитывающая деформационное упрочнение и удельную работу разрушения обрабатываемого материала, связанную с образованием новых поверхностей.

2) Созданы алгоритмы и программа расчета и выбора переднего угла для винтового и торцового зуба режущей части из условия минимальной силы резания.

3) Экспериментальным путем определена удельная работа разрушения конструкционной стали 45 и титанового сплава ВТ6, затрачиваемая на образование двух новых поверхностей при резании.

Теоретическая значимость. Теоретическая значимость заключается в разработке методики и алгоритмов расчета силовых параметров режима фрезерования при обработке уступа и засверливания заготовки с осевой подачей. Методика обеспечивает оценку силовых параметров процесса фрезерования концевыми фрезами и определение геометрических параметров режущей части зубьев концевой фрезы при обработке пластичных металлических материалов.

Практическая значимость. Для сокращения временных затрат на начальном этапе проектирования разработаны алгоритмы и программы оценки

геометрических параметров режущей части зубьев концевой фрезы. Научно-техническая новизна и практическая значимость достигнутых результатов исследования подтверждена Свидетельством РФ №2024614116 о государственной регистрации программного комплекса EndMills для ЭВМ и Патентом РФ №226849 на полезную модель износостойкой цельной концевой фрезы.

Методология и методы исследования. Исследования базируются на положениях теории резания и пластического течения материала, характеризующегося деформационным упрочнением, на методах моделирования и экспериментального исследования процессов механической обработки, на методах проектирования, расчета и определения геометрических параметров режущей части рабочего инструмента, а также на методах математического анализа, численной оценки и расчета параметров, на методах планирования эксперимента. Для научно-практической реализации результатов теоретического исследования применялись современные методы объектно-ориентированного программирования на языке C#2.0, а также программный комплекс Matlab и средства автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и AutoCAD.

Положения, выносимые на защиту:

1) Разработанные методика и алгоритмы расширяют область практического применения средств проектирования геометрических параметров режущей части рабочего инструмента для процессов фрезерования за счет верификации мощности вязкого разрушения, затрачиваемой на образование двух новых поверхностей, и динамики изменения напряжения течения в процессе деформирования материала.

2) Разработанная методика обеспечивает расчет силовых параметров с погрешностью не более 25 % относительно экспериментальных значений, полученных в процессе резания концевой фрезой при обработке уступа, и не более 15 % при засверливании заготовки с осевой подачей.

3) Алгоритмы расчета на основе критериев минимальных значений силовых параметров для заданных условий фрезерной обработки обеспечивают повышение

оперативности принятия решения при выборе геометрических параметров режущей части зубьев концевой фрезы.

4) Данные сравнительных испытаний спроектированной концевой фрезы при обработке титанового сплава ВТ6 подтверждают увеличения периода стойкости до 15 % при обработке уступа и до 36 % при обработке кармана с засверливанием.

Достоверность результатов исследования и рекомендаций основана на корректном использовании данных экспериментальных исследований, выполненных на стендах и опытных образцах в лабораторных и производственных условиях; на сравнении расчетных данных с известными экспериментальными данными авторитетных научных школ, а также на апробации и обсуждении достигнутых результатов исследования на научных всероссийских и международных конференциях. Достоверность достижения научных результатов подтверждена положительными результатами независимой экспертизы опубликованных трудов в рецензируемых российских и международных изданиях.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: IX Международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство», г. Рыбинск, Россия, 20-21 апреля 2023; 12 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 24-27 сентября 2019; 10 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 25-28 сентября 2017; 8 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 23-26 сентября 2015; Международная научно-техническая конференция «Инноватика в технологии конструкционных материалов», г. Москва, Россия, 27 марта 2014 года; 6 Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 25-28 сентября 2013; 4

Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 29-30 сентября 2011.

Результаты диссертационных исследований приняты к практическому использованию в научно-производственной и образовательной деятельности предприятий и учебных учреждений.

Публикации. Опубликовано самостоятельно и в соавторстве 13 работ, в том числе 9 в рецензируемых изданиях, получены Свидетельство РФ на программу для ЭВМ и Патент РФ на полезную модель, изданы тезисы докладов в сборниках трудов Международных и Всероссийских научно-технических конференций.

Личный вклад в науку. Научные проблемы и задачи, подлежащие решению в диссертационной работе, а также достигнутые теоретические, прикладные и опытно-внедренческие результаты исследования сформулированы и обоснованы соискателем лично. Информационно-патентные исследования объекта и предмета научной работы, а также структурно-функциональная разработка средств технического оснащения и планов проведения экспериментальных исследований выполнены при непосредственном участии соискателя ученой степени. Соавторы отдельных результатов выполненных научно-практических работ отмечены в ссылках на совместные публикации.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 161 странице текста и содержит 83 рисунка, 19 таблиц, список литературы включает 186 библиографических записей.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, изложены проблемы современного состояния объекта и предмета диссертационной работы. Сформулированы цель и задачи исследования, новизна, теоретическая и практическая значимость работы, применяемые методы решения поставленных задач. Сформулированы основные научные положения, выносимые на защиту. Определены степень достоверности достигнутых результатов, сведения об апробации диссертационной работы.

В первой главе «Аналитическое исследование методов и средств проектирования геометрических параметров режущей части рабочего инструмента» рассмотрено влияние геометрических параметров режущей части концевых фрез на процесс обработки и выполнен анализ известных методов моделирования процесса резания.

Сокращение оперативного времени обработки заготовок за счет снижения времени замены рабочего инструмента возможно при увеличении периода стойкости режущего инструмента. Основными направлениями модернизации концевых фрез являются применение эффективных покрытий и новых инструментальных материалов, а также изменение геометрических параметров режущей части инструмента. Передний угол лезвия режущей кромки предопределяет процесс стружкообразования. Увеличение переднего угла уменьшает коэффициент усадки стружки и приводит к снижению пластической деформации и мощности (силы резания), расходуемой на процесс резания.

Преимуществом методов расчета процесса резания перед эмпирическими и численными является их более высокая оперативность. Анализ известных отечественных и зарубежных моделей расчета силовых параметров резания показал, что данные модели не учитывают мощность разрушения, обусловленную образованием новых поверхностей при отделении срезаемого слоя от заготовки.

Установлено, что большинство аналитических моделей процессов резания разработаны для инструмента, когда угол наклона главной режущей кромки равен нулю. Но, как правило, вращающийся инструмент изготавливают с определенным углом наклона главной режущей кромки, чтобы обеспечить беспрепятственное удаление стружки из зоны резания. Поэтому при изучении механических процессов резания концевыми фрезами необходимо разработать модели, учитывающие закономерности влияния угла наклона режущей кромки на ход процесса фрезерной обработки.

Во второй главе «Разработка и исследование расчетно-аналитических средств методического обеспечения процесса проектирования геометрических параметров режущей части концевых фрез» предложена методика расчета силовых

параметров резания концевыми фрезами, основанная на модели косоугольного резания профессора Оленина Л.Д., а также разработаны средства алгоритмического и программного обеспечения расчета лезвийных параметров зубьев концевой фрезы.

Аналитическая модель косоугольного резания базируется на энергетическом подходе, а стружкообразование – это процесс непрерывного пластического деформирования материала, обладающего деформационным упрочнением. Трение на площадках контакта описывается законом Кулона-Амонтона, то есть находится в прямо пропорциональной зависимости от нормального давления и не превышает предельной величины. В искомом решении учитывается мощность, затрачиваемая на образование новых поверхностей в плоскости резания. Уравнение энергетического баланса процесса резания имеет вид:

$$P_z = \Delta P_\varepsilon + \Delta P_{\mu 1} + \Delta P_{\mu 3} + \Delta P_p,$$

где P_z – сила резания; ΔP_ε , $\Delta P_{\mu 1}$, $\Delta P_{\mu 3}$, ΔP_p – доли силы резания, затрачиваемые соответственно на пластическую деформацию, на трение стружки о переднюю поверхность инструмента, на трение задней поверхности инструмента о деталь, на образование новых поверхностей.

Методика расчета силовых параметров резания концевыми фрезами, основанная на модели косоугольного резания, описывает два вида обработки – фрезерование уступа и засверливание с осевой подачей.

Графические элементы схемы резания для встречного фрезерования уступа представлены на рисунке 1. При расчете сил учитывается зависимость сечения срезаемого слоя и изменение силовых параметров от угла контакта, изменение кинематических углов в зависимости от величины подачи, а также влияние угла наклона главной режущей кромки на процесс стружкообразования.

Для определения силовых параметров на режущих кромках выделяются бесконечно малые режущие элементы. Считается, что каждый подобный режущий элемент осуществляет обработку поверхности материала в условиях

косоугольного резания. Результирующая окружная сила резания P_ψ и сила нормального давления P_{n3} , действующая на обработанную поверхность, определяются интегрированием вдоль режущей кромки по углу контакта в пределах изменения переменной ψ от $\psi_1=0$ до $\psi_2=\psi_0$. Составляющие силы резания в станочной системе координат P_x , P_y , P_z определены как проекции окружной силы резания P_ψ и нормальной силы P_{n3} , действующей на задней поверхности инструмента, на координатные оси станка:

$$P_x = \pm P_\psi \cdot \cos(\psi) + P_{n3} \cdot \sin(\psi), \quad (1)$$

$$P_y = \mp P_\psi \cdot \sin(\psi) + P_{n3} \cdot \cos(\psi), \quad (2)$$

$$P_z = P_\psi \cdot \operatorname{tg}(\omega - \rho),$$

где ψ_0 – угол охвата фрезы; ψ – угловое положение на дуге контакта; ω – угол наклона главной режущей кромки; ρ – угол трения.

В уравнениях (1) и (2) верхние алгебраические знаки, стоящие перед окружной силой, соответствуют встречному фрезерованию, а нижние – попутному. При расчете силовых параметров в случае засверливания с осевой подачей, учитывается изменение деформации при стружкообразовании, кинематических углов и осевой силы в любой точке торцовой режущей кромки. Графические элементы схемы резания приведены на рисунке 2.

Торцовая кромка представляется совокупностью бесконечно малых элементов, осуществляющих косоугольное резание. Осевая сила резания P_z , действующая со стороны режущей кромки на заготовку, определяется суммированием составляющих для каждого бесконечно малого элемента вдоль всей режущей кромки.

Разработанная методика положена в основу программного комплекса расчета силовых параметров процесса резания концевыми фрезами. Программный комплекс EndMills в режиме реального времени для заданных условий обработки определяет силовые параметры процесса резания концевыми фрезами, их зависимость от режимов резания, а также геометрические параметры режущей

части концевой фрезы на основе критерия минимальных значений силовых параметров.

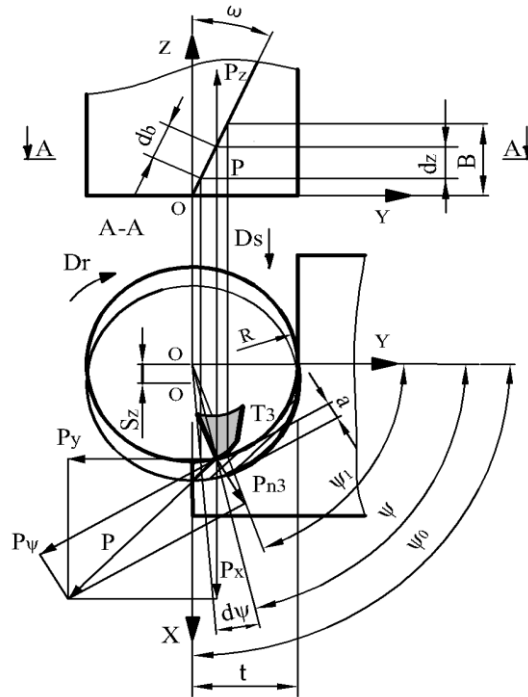


Рисунок 1 – Графические элементы схемы резания для встречного фрезерования уступа

По результатам тестовых расчетов, выполненных в программе EndMills, установлено:

- при увеличении угла наклона главной режущей кромки ω с 1° до 55° доля силы резания ΔP_ϵ , затрачиваемой на пластическую деформацию в плоскости стружкообразования, при обработке стали 45 увеличивается на 24 %;

- при обработке титанового сплава ВТ6 доля силы резания ΔP_p , связанная с образованием новых поверхностей, вносит большой вклад (до 55 %) в силу резания, чем доля силы резания ΔP_ϵ , затрачиваемой на пластическую деформацию в плоскости стружкообразования (до 39 %);

- существует такое значение переднего угла заточки, при котором сила резания для заданных условий обработки будет иметь минимальное значение.

При сравнении экспериментальных значений с расчетными установлено, что разработанная методика обеспечивает определение силовых параметров резания пластичного металла с погрешностью не более 25 % относительно

экспериментальных значений при фрезеровании уступа и не более 15 % при засверливании материала с осевой подачей.

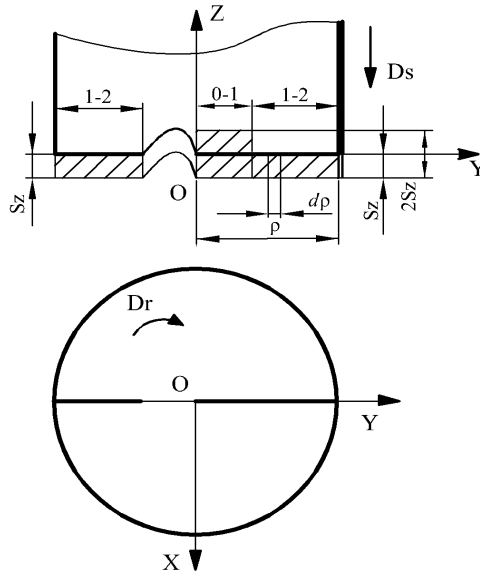


Рисунок 2 – Схема для расчета осевой силы при засверливании

В третьей главе «Разработка средств методического сопровождения и технического обеспечения процессов экспериментального исследования силовых параметров резания концевыми фрезами» определены зависимости силовых параметров при фрезеровании стали 45 от режимов обработки и геометрических параметров режущей части, а также установлены зависимости напряжения течения от логарифмической деформации и удельная работа разрушения для образцов из стали 45 и титанового сплава ВТ6.

Экспериментальные исследования силовых параметров процесса фрезерования заготовки из стали 45 концевыми двузубыми фрезами из твердого сплава Т14К8 без покрытия проводились на трехосевом обрабатывающем центре фирмы Hermle модели UWF 1202 Н, без применения смазочно-охлаждающей жидкости. Измерение технологических сил резания P_x , P_y , P_z в процессе встречного фрезерования уступа и осевой силы P_z в процессе засверливания осуществлялось контрольно-измерительной системой, состоящей из динамометра, усилителя, адаптера, аналого-цифрового преобразователя и персонального компьютера (см. рисунок 3) с относительной погрешностью 3,7%.

Режимы обработки и параметры режущих кромок зубьев фрез:

- при фрезеровании уступа скорость резания $v - 50/100/150$ м/мин; ширина фрезерования $B - 1/2$ мм; подача на зуб $S_z - 0,05/0,1/0,15$ мм/зуб; глубина фрезерования $t - 0,5/1/2$ мм; угол наклона винтовой канавки $\omega = 30^\circ$; задние углы винтового режущего зуба $\alpha_{B1}/\alpha_{B2} = 10^\circ/20^\circ$; задние углы торцового режущего зуба $\alpha_{T1}/\alpha_{T2} = 8^\circ/16^\circ$; передние углы винтового зуба $\gamma_B = 5^\circ/10^\circ/15^\circ$; передний угол торцового зуба $\gamma_T = 5^\circ$;

- при засверливании с осевой подачей скорость резания $v - 50/100/150$ м/мин; длина резания $l - 4$ мм; подача $S_z - 0,025/0,05$ мм/зуб; угол наклона винтовой канавки $\omega = 30^\circ$; задние углы винтового режущего зуба $\alpha_{B1}/\alpha_{B2} = 10^\circ/20^\circ$; задние углы торцового режущего зуба $\alpha_{T1}/\alpha_{T2} = 8^\circ/16^\circ$; передний угол винтового зуба $\gamma_B = 10^\circ$; передний угол торцового зуба $\gamma_T = 5^\circ$.



Рисунок 3 – Экспериментальная измерительная система

Эпюра изменения технологических сил P_x , P_y , P_z , полученная при обработке уступа, приведена на рисунке 4. Первый и второй зубья фрезы поочередно входят в контакт с обрабатываемой поверхностью заготовки. Период времени с момента, когда первый зуб фрезы начал обработку и до следующего его контакта с заготовкой, равен одному обороту фрезы. Технологические силы резания при обработке уступа изменяются от минимального значения до максимального, в зависимости от угла контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью материала.

Изменение технологических сил прямо пропорционально изменению толщины срезаемого слоя a .

Эпюра измерительного сигнала при засверливании с осевой подачей приведена на рисунке 5. При засверливании площадь сечения срезаемого слоя постоянна, поэтому значение осевой силы резания P_z не изменяется в процессе обработки.

По результатам исследования (210 экспериментальных эпюр при встречном формировании уступа и 21 экспериментальная эпюра при засверливании с осевой подачей) установлено:

- с ростом подачи S_z , ширины фрезерования B и глубины фрезерования t технологические силы резания P_x , P_y , P_z при встречном фрезерования уступа возрастают пропорционально. Осевая сила P_z при засверливании также возрастает с увеличением подачи S_z ;

- при увеличении скорости резания v с 50 до 100 м/мин силы резания возрастают, а при увеличении со 100 до 150 м/мин – убывают как при обработке уступа, так и при засверливании с осевой подачей;

- с изменением переднего угла винтового зуба γ_B с 5° до 15° при фрезеровании уступа технологическая сила резания P_x уменьшается.

Для определения зависимости напряжения течения от величины деформации применялся метод осадки цилиндрического образца с выточками (ГОСТ 25.503-97).

Результаты исследования (см. рисунок 6) позволяют аппроксимировать кривую упрочнения линейной функцией вида:

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \cdot (1 + b \cdot \Delta\varepsilon),$$

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_1 \cdot \Delta\varepsilon}.$$

Для определения удельной работы разрушения использовался метод, предложенный Гуляевым. Ударная вязкость определялась по результатам

испытаний на ударный изгиб (ГОСТ 9454-78) образцов при одинаковом сечении (10x10 мм) с радиусами концентратора $R=0,3$ мм и $R=0,6$ мм.

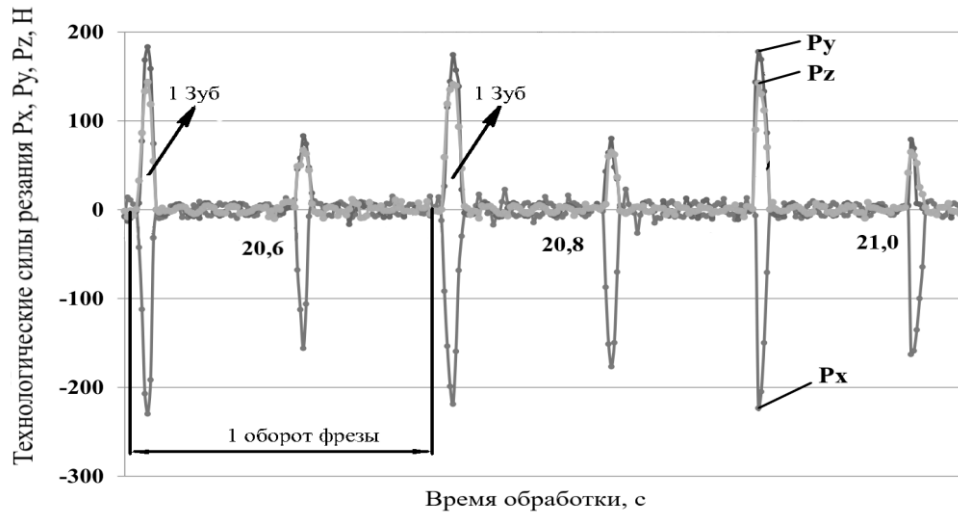


Рисунок 4 – Резы отдельных зубьев при встречном фрезеровании уступа: $v=50$ м/мин, $B=1$ мм, $t=2$ мм, $S_z=0,1$ мм/зуб

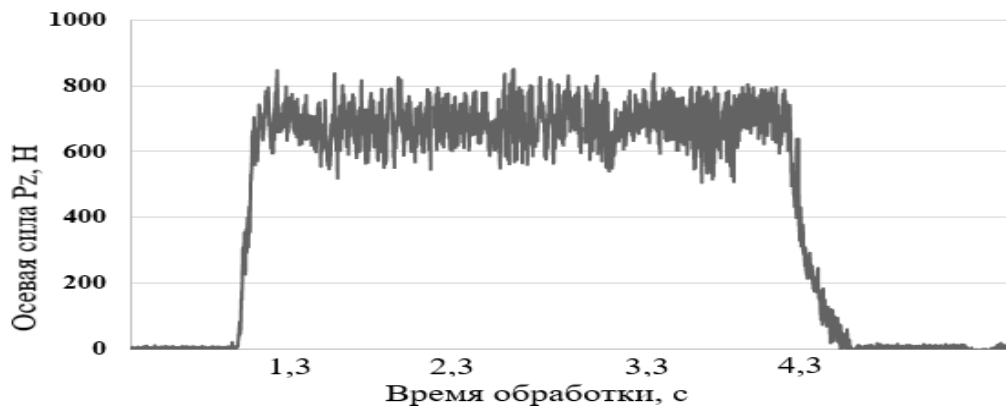


Рисунок 5 – Эпюра изменения осевой силы резания при засверливании: $v=100$ м/мин, $S_o=0,05$ мм/об, $l=4$ мм

Механические характеристики, полученные в ходе экспериментального исследования, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Физико-механические свойства стали 45 и титанового сплава ВТ6

Материал	Твердость HV	Экстраполированный предел текучести σ_{s0} , МПа	Коэффициент, характеризующий наклон кривой упрочнения b	Работа распространения трещины a_p , Дж/см ²
Сталь 45	162-169	787	0,41	10,94
ВТ6	301	1100	0,1	43,463

В четвертой главе «Разработка и создание фрезы с повышенным периодом стойкости для обработки титанового сплава ВТ6» изложены результаты проектирования опытной фрезы для обработки титанового сплава ВТ6 и методика и результаты сравнительных ускоренных испытаний на износостойкость изготовленной фрезы и стандартных фрез.

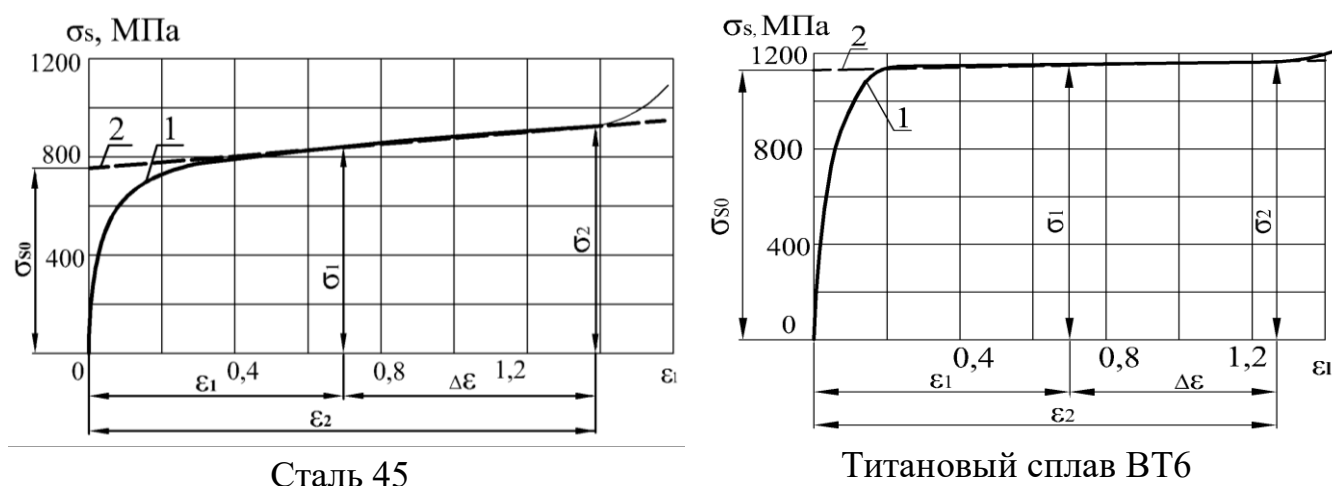


Рисунок 6 – Экспериментальные кривые упрочнения (1) и их линейная аппроксимация (2) для стали 45 и титанового сплава ВТ6

Расчетом с использованием программного комплекса EndMills определялись параметры режущей кромки зубьев фрезы по титановому сплаву ВТ6: передний угол винтового режущего зуба $\gamma_B = 15^\circ$, передний угол торцового режущего зуба $\gamma_T = 13^\circ$. Выбор значений передних углов выполнялся на основе критерия минимальных значений силовых параметров. На рисунке 7, а представлена вкладка программного комплекса EndMills, где показана зависимость окружной силы P_ψ от переднего угла винтового режущего зуба γ_B в графическом виде, а на рисунке 7, б – в табличном виде. Эскиз спроектированной опытной фрезы представлен на рисунке 8. Для оценки стойкости опытной фрезы по сравнению со стандартными фрезами проводились сравнительные ускоренные испытания. На предприятии ООО «Технологические покрытия» изготовлены двузубые фрезы из твердого сплава ВК8 с износостойким нанокпозиционным покрытием nASo.

Параметры режущей кромки зубьев фрез следующие: фреза модернизированная $\gamma_B = 15^\circ$ и $\gamma_T = 13^\circ$; фреза стандартная: $\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$; фреза стандартная: $\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$. В качестве заготовок использовались

технологические образцы из титанового сплава ВТ6. Фрезерование осуществлялось на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ фирмы Dugard EAGLE 1500 с применением СОЖ.

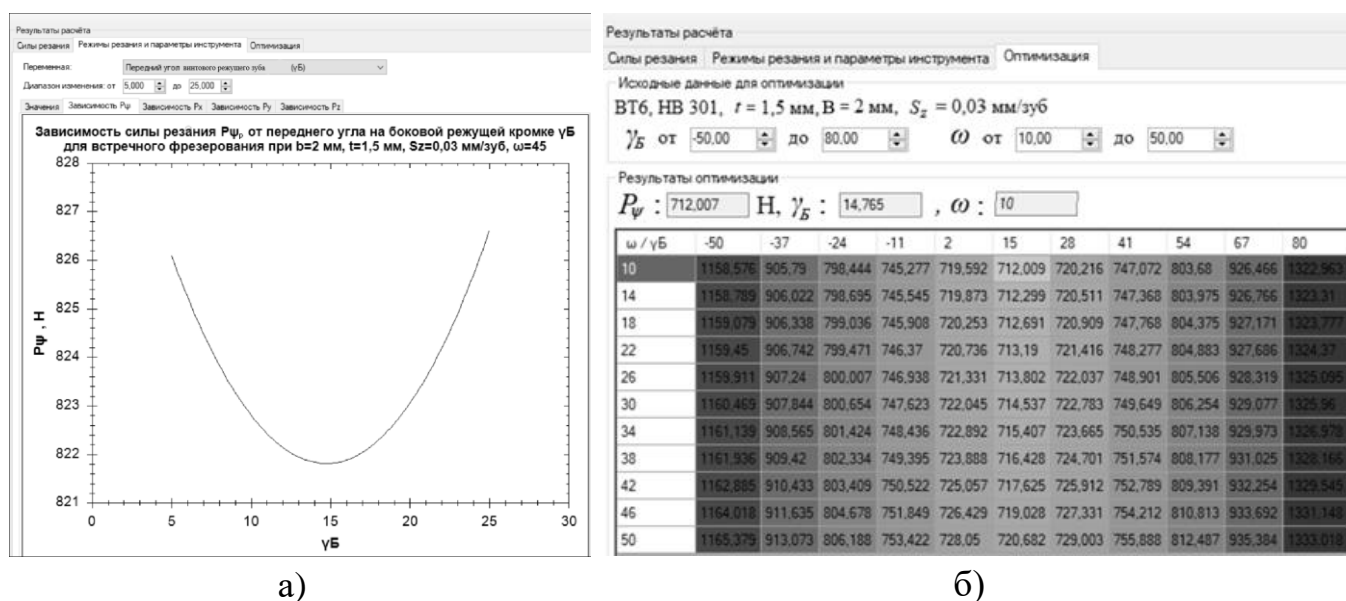


Рисунок 7 – Зависимость окружной силы P_{ψ} от переднего угла винтового режущего зуба γ_B , где: а – в графическом виде; б – в табличном виде

Критерием предельного износа для полувинтовой обработки титанового сплава ВТ6 принята ширина фаски износа по задней поверхности зубьев $h_3=0,3$ мм. Ускорение испытаний на стойкость обеспечивалось предельными режимами обработки титанового сплава ВТ6 по скорости резания:

- при обработке уступа скорость резания $v - 110$ м/мин, подача на зуб $S_z - 0,03$ мм/зуб, ширина резания $B - 2$ мм, глубина фрезерования $t - 1,5$ мм;
- при обработке кармана с предварительным засверливанием $v - 60$ м/мин, подача на зуб $S_z - 0,025$ мм/зуб, длина засверливания $l - 1$ мм.

При обработке уступа установлено, что период стойкости спроектированной фрезы с передними углами $\gamma_B = 15^\circ$ и $\gamma_T = 13^\circ$ на 9,4% превышает период стойкости стандартной фрезы с передними углами $\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$ и на 15% превышает период стойкости стандартной фрезы с передними углами $\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$.

При засверливании с осевой подачей установлено, что период стойкости спроектированной и изготовленной фрезы с передними углами $\gamma_B = 15^\circ$ и $\gamma_T = 13^\circ$

на 29% превышает период стойкости стандартной фрезы с передними углами $\gamma_B = 10^\circ$ и $\gamma_T = 12^\circ$ и на 36% превышает период стойкости стандартной фрезы с передними углами $\gamma_B = 5^\circ$ и $\gamma_T = 0^\circ$. Состояние винтового режущего зуба опытной фрезы после обработки уступа приведено на рисунке 9, а, состояние торцового режущего зуба после засверливания с осевой подачей – на рисунке 9, б.

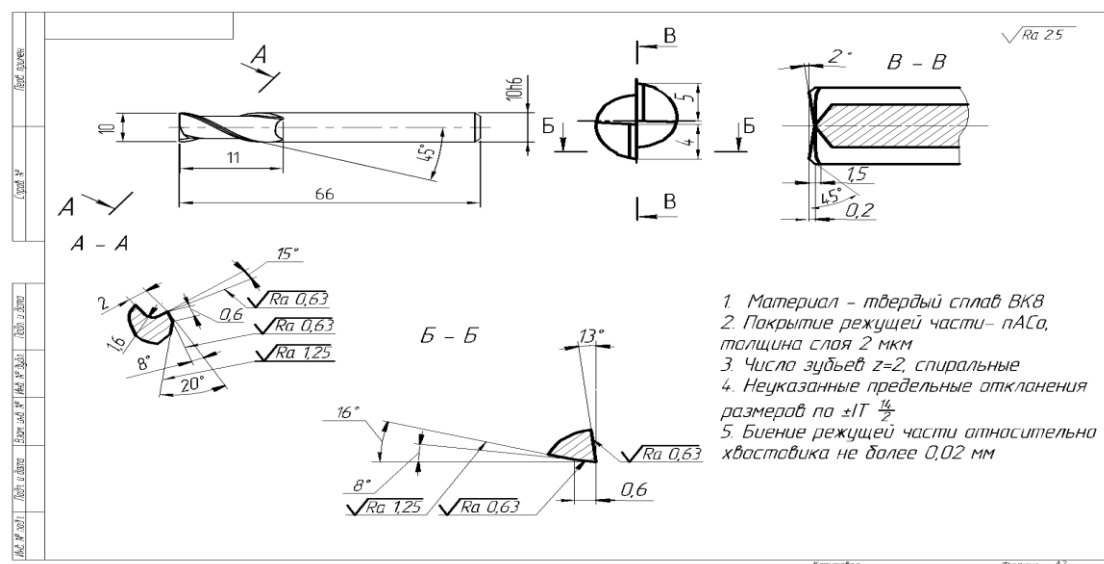
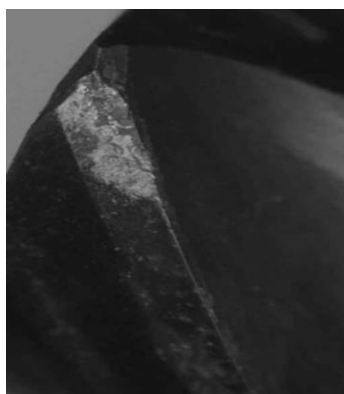
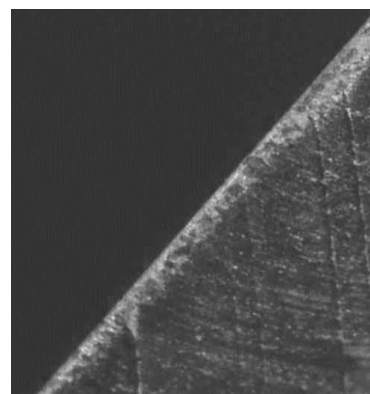


Рисунок 8 – Эскиз опытной фрезы для обработки титанового сплава VT6



а)



б)

Рисунок 9 – Вид опытной фрезы, где: а – винтовой зуб $h_3=0,32$ мм ($T=8,75$ мин); б – торцовый зуб $h_3=0,31$ мм ($T=4,5$ мин)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная для предприятий современного отечественного машиностроения задача совершенствования методики расчетно-аналитического и экспериментального исследования геометрических параметров режущей части фрезы и увеличения периода стойкости рабочего режущего

инструмента, предназначенного для использования в технологических процессах фрезерной обработки пластичных металлических материалов.

Основные результаты выполненных исследований:

- обоснована актуальность разработки методики расчета силовых параметров резания пластичных металлов концевыми фрезами;

- экспериментально исследована взаимозависимость процессов упрочнения и деформации материала при резании стали 45 и титанового сплава ВТ6. Предложен дополнительный исходный параметр расчета и определена удельная работа разрушения в материале для стали 45 и титанового сплава ВТ6;

- разработаны средства методического обеспечения и расчетно-графические модели процесса резания пластичных металлов концевыми фрезами. Методика расчета обеспечивает определение силовых параметров резания пластичного материала с погрешностью не более 25% относительно экспериментальных значений при обработке уступа и не более 15% при засверливании материала с осевой подачей.

- разработаны средства алгоритмического и программного обеспечения процесса проектирования концевых фрез. Достигнуто повышение периода стойкости концевой фрезы на 15 % при обработке уступа и до 36 % при засверливании титанового сплава ВТ6.

Предлагается использовать результаты исследований в адаптивных системах управления промышленным оборудованием, при проектировании технологии обработки резанием и конструировании металлорежущего инструмента, а также в процессе переподготовки кадров машиностроительных специальностей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях

1. Леквеишвили, М. А. Расчет силовых параметров процесса формообразования заготовок концевыми фрезами / М. А. Леквеишвили, А. Б. Люхтер, Н. Н. Давыдов. – Текст: непосредственный // iPolytech Journal. – 2023. – Т.

27. – № 4. – С. 645–654. – DOI 10.21285/1814-3520-2023-4-645-654. – К1. – Перечень ВАК.

2. Леквеишвили, М. А. Методика расчета геометрии режущей части концевой фрезы. Расчет геометрии зуба на цилиндрической части концевой фрезы / М. А. Леквеишвили. – Текст: непосредственный // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2023. – №2 (65). – С. 109–115. – К3. – Перечень ВАК.

3. Леквеишвили, М. А. Экспериментальное построение кривых упрочнения для анализа процесса резания материалов, обладающих деформационным упрочнением / Л. Д. Оленин, М. А. Леквеишвили. – Текст: непосредственный // СТИН. – 2015. – №10. – С. 23–25. – К3. – Перечень ВАК.

4. Леквеишвили, М. А. К разработке аналитической модели косоугольного резания / Л. Д. Оленин, М. Г. Сторчак, М. А. Леквеишвили. – Текст: непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ». – 2014. – №1(19). – С. 123–128. – DOI 10.17816/2074-0530-67804. – К3. – Перечень ВАК.

5. Шапаровская, М. А. Сопоставительный анализ методов расчета процесса резания (к разработке аналитической методики расчета процесса резания) / Ю. В. Максимов, Л. Д. Оленин, М. А. Шапаровская. – Текст: непосредственный // Известия МГТУ «МАМИ». – 2011. – №1 (11). – С.159–169. – DOI 10.17816/2074-0530-69937. – К3. – Перечень ВАК.

6. Lekveishvili, M. A. Improvement of Analytical Model for Oblique Cutting— Part I: Identification of Mechanical Characteristics of Machined Material / M. Storchak, M. A. Lekveishvili. – Текст: электронный // Metals. – 2023. –Vol. 13. –1750. – DOI 10.3390/met13101750. – Web of Science, Scopus.

7. Lekveishvili, M. A. Hardening curves for materials with strain hardening / L. D. Olenin, M. A. Lekveishvili. Текст: электронный // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol.36. – N5. – P. 404-406. – DOI 10.3103/S1068798X16050166. – Web of Science, Scopus.

8. Патент № 226849 Российская Федерация, МПК В23С 5/10 (2006.01), В23С 5/10 (2024.01). Фреза концевая : № 2024108528 : заявлено 01.04.2024 :

опубликовано 26.06.2024. Бюл. № 18 / Давыдов Н. Н., Люхтер А. Б., Леквеишвили М. А. – 16 с. – Текст : непосредственный.

9. Свидетельство № 2024614116 Российская Федерация. Программа расчета геометрии концевых фрез "EndMills" : № 2024611548 : заявлено 29.01.2024 : опубликовано 20.02.2024 / Люхтер А. Б., Леквеишвили М. А., Оленин Л. Д. – 1 с. – Текст : непосредственный.

Публикации в других изданиях

10. Леквеишвили, М. А. К разработке методики расчета рациональной геометрии режущей части концевой фрезы. Расчет геометрии торцового зуба / М. А. Леквеишвили, Л. Д. Оленин. – Текст: непосредственный // Будущее машиностроения России: материалы двенадцатой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов с международным участием / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2019. – С. 71–74. – ISBN 978-5-7038-5308-5. – РИНЦ.

11. Леквеишвили, М. А. О путях создания высокоэффективного режущего инструмента / М. А. Леквеишвили, Л. Д. Оленин. – Текст: непосредственный // Будущее машиностроения России: материалы десятой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов с международным участием / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2017. – С. 11–13. – ISBN 978-5-7038-4791-6. – РИНЦ.

12. Леквеишвили, М. А. К разработке методики расчета силовых параметров фрезерования на основе аналитической модели косоугольного резания / М. А. Леквеишвили, Л. Д. Оленин. – Текст: непосредственный // Будущее машиностроения России: материалы восьмой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов с международным участием / МГТУ им. Н. Э. Баумана. – Москва, 2015. – С. 27–29. – ISBN 978-5-7038-4334-5. – РИНЦ.

13. Шапаровская (Леквеишвили), М. А. К разработке аналитической методики расчета силовых параметров резания / М. А. Шапаровская. – Текст : электронный // Будущее машиностроения России : электронный сборник докладов 6-ой всероссийской конференции молодых ученых и специалистов / МГТУ им. Баумана. – Москва, 2013. – электрон. опт. диск (CD-ROM).