

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «Ивановский

государственный энергетический

университет имени В.И. Ленина»

доктор технических наук, профессор



В. В. Тютиков

« 11 » сентября 2024 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию и автореферат соискателя Леквешвили Марии Анатольевны, подготовленной на тему «Повышение износостойкости концевых фрез путем расчетно-экспериментального обоснования геометрических параметров режущей части инструмента» и представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»

### АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В настоящее время все более высокие требования предъявляются к качеству механической обработки конструкционных материалов и увеличению периода стойкости рабочего режущего инструмента, что является одной из основополагающих проблем модернизации современного машиностроения. Успешное решение подобных задач невозможно без изучения физической структуры обрабатываемых материалов, режимов механической обработки изделий, исследования параметров и характеристик рабочего инструмента в их взаимосвязи с физико-механическими свойствами заготовок.

Достижения современного материаловедения и последовательное расширение сферы промышленного применения перспективных методов механической

обработки заготовок 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 технологической оснастки.

Основными теоретическими результатами диссертационной работы, подтверждающими актуальность выполненного исследования, являются предлагаемые методика и алгоритмы расчета силовых параметров режима фрезерования при подготовке к обработке уступа и засверливания заготовки с осевой подачей инструмента. Разработанное методическое обеспечение определяет возможность априорной оценки силовых параметров процесса фрезерования концевыми фрезами и определение параметров режущей кромки зубьев концевой фрезы, предназначенной для применения в новых технологических процессах механической обработки перспективных пластичных металлических материалов.

Основные практические результаты выполненного диссертационного исследования проектируемых концевых фрез, полученные в ходе ускоренных производственных испытаний разработанного и стандартного режущего рабочего инструмента на аттестованном промышленном оборудовании, подтверждают актуальность применения достижений современных информационных технологий при модификации программного обеспечения оценки параметров режущей кромки зубьев концевой фрезы. Этим повышается достоверность определения параметров рабочего инструмента, предназначенного для механической фрезерной обработки пластичных металлических материалов, и обеспечивается сокращение временных трудовых и материальных затрат производственных предприятий на начальном этапе проектирования инструмента.

Рукопись диссертации соискателя Леквеишвили М.А. состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Тема диссертации посвящена разработке и исследованию современных технических и технологических решений рабочего инструмента, предназначенного для механической обработки пластичных металлических материалов.

**Во введении** автором обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель диссертационной работы и научные задачи, подлежащие решению. Дана оценка новизны результатов решения поставленных задач, их теоретическая и практическая значимость. В положениях, выносимых на защиту, сформулированы преимущества результатов решения поставленных задач; отмечены результаты практической апробации достижений.

**В первой главе** выполнено исследование известных методов проектирования параметров режущей части инструмента, рассмотрено влияние геометрических параметров на процесс обработки и выполнен анализ приемлемых методов моделирования процесса резания. Указано, что сокращение оперативного времени обработки заготовок возможно при увеличении периода стойкости режущего инструмента, и известные модели не учитывают мощность разрушения, при образовании новых поверхностей. Установлено, что при изучении механических процессов резания концевыми фрезами необходимо разработать модели, учитывающие закономерности влияния угла наклона режущей кромки на ход процесса механической обработки.

**Во второй главе** отражены результаты исследования и разработки расчетно-аналитических средств методического обеспечения процесса проектирования параметров режущей части концевых фрез, предложена и обоснована методика расчета силовых параметров резания концевыми фрезами, основанная на модели косоугольного резания, а также разработаны средства алгоритмического и программного обеспечения расчета лезвийных параметров зубьев концевой фрезы. Аналитическая модель косоугольного резания базируется на энергетическом подходе. Определено, что трение на площадках контакта описывается законом Кулона-Амонтона, то есть находится в прямо пропорциональной зависимости от нормального давления и не превышает предельной величины. Разработанная методика положена в основу программного комплекса расчета силовых параметров процесса резания концевыми фрезами. Дана оценка погрешности определения сило-

вых параметров резания пластичного материала при фрезеровании уступа и при засверливании материала заготовки с осевой подачей.

**В третьей главе** сформулированы результаты исследования средств методического сопровождения и технического обеспечения процессов экспериментального изучения силовых параметров резания концевыми фрезами. Установлены зависимости силовых параметров при фрезеровании пластичных металлов от режимов обработки и геометрических параметров режущей части. Определены 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 заготовок концевыми двузубыми фрезами выполнены на аттестованном промышленном трехосевом обрабатывающем центре. Дана оценка погрешности измерения технологических сил резания при встречном фрезеровании уступа и осевой силы в процессе засверливания. Приведен состав контрольно-измерительной системы и определены оптимальные режимы обработки и параметры режущих кромок зубьев фрезы. Установлено, что технологические силы резания изменяются от минимального значения до максимального в зависимости от угла контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью материала.

**В четвертой главе** расчетом с использованием программного комплекса «EndMills» определены параметры режущей кромки лезвия зубьев фрезы. Выбор значений передних углов выполнен на основе критерия минимальных значений силовых параметров. Приведены результаты проектирования и создания фрезы с повышенным периодом стойкости для обработки пластичных сплавов. Изложены результаты разработки опытной фрезы, предназначенной для обработки титанового сплава ВТ6, и методика сравнительных ускоренных испытаний на стойкость изготовленной фрезы и стандартных фрез.

**В заключении** диссертации изложены итоги выполненного исследования, даны рекомендации и определены перспективы дальнейшей разработки темы.

**В приложениях** приведена информация о зарегистрированных значениях экспериментальных данных, и о практическом использовании результатов дис-

сертационного исследования в инновационной научно-образовательной деятельности и промышленном производстве.

## **НОВИЗНА И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ**

Новизна и научная значимость работы заключается в следующем:

1) Результаты анализа, моделирования и исследования физико-механических свойств пластичных материалов отличаются тем, что установлена взаимозависимость процессов упрочнения и деформации материала при резании стали 45 и титанового сплава ВТ6.

2) Разработанная методика проектирования и расчета силовых параметров процесса резания пластичного материала концевыми фрезами отличается тем, что обоснован дополнительный исходный параметр аналитического расчета и определена удельная работа распространения трещины в пластичном материале для стали 45 и титанового сплава ВТ6.

3) Впервые разработаны средства алгоритмического и программного обеспечения расчета параметров зубьев концевой фрезы (см. Свидетельство РФ №2024614116).

4) Методика расчета силовых параметров резания пластичного материала отличается низким уровнем вычислительной погрешности; впервые в соответствии с разработанной методикой рассчитана и разработана конструкция цельной концевой фрезы, обладающей повышенной износостойкостью (см. Патент РФ №226849).

5) Данные сравнительных испытаний стандартных и разработанных концевых фрез в опытно-экспериментальном производстве подтверждают увеличение периода стойкости проектируемого режущего инструмента.

### **Практическая значимость результатов диссертационной работы**

С целью обеспечения научно-практической востребованности результатов выполненного диссертационного исследования разработаны алгоритмы и программный комплекс «EndMills», защищенный Свидетельством РФ от 20.02.2024 № 2024614116 о государственной регистрации программ для ЭВМ, предназначен-

ный для информационно-технологического сопровождения процедуры оценки параметров режущей кромки зубьев концевой фрезы на начальном этапе её проектирования. Выполнена практическая апробация разработанных средств расчетно-аналитического проектирования конструкции цельной твердосплавной концевой фрезы, научно-практическая новизна которых подтверждена Патентом РФ от 26.06.2024 № 226849 на полезную модель.

Результаты выполненного диссертационного исследования приняты к практическому использованию в инновационной научно-производственной деятельности промышленного предприятия ООО «Технологические покрытия», г. Москва, а также в учебной и в научной работе ВлГУ. Практическая значимость результатов диссертационной работы подтверждена рецензентами оргкомитетов семи международных и всероссийских научно-технических конференций.

## **ОБОСНОВАННОСТЬ И ДОСТОВЕРНОСТЬ ДОСТИГНУТЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Обоснованность и достоверность научных положений и основных выводов диссертации подкрепляется результатами пробных расчетов и испытаний, а также апробацией достигнутых результатов на международных и всероссийских конференциях и форумах. Достоверность и обоснованность основана на правомерном использовании методов и средств физико-математического обоснования и моделирования процессов фрезерной обработки пластичных металлических материалов, а также на корректном использовании данных экспериментального исследования опытных образцов проектируемых концевых фрез. Эксперименты выполнены на аттестованных стендах с использованием специализированного контрольно-измерительного оборудования в лабораторных и производственных условиях. Расчетно-экспериментальные данные, полученные с помощью разработанной методики, не противоречат известным экспериментальным данным авторитетных научных школ и известных ученых.

Достоверность достижения научных результатов подтверждена рецензентами независимой экспертизы научных публикаций в ведущих российских и меж-

дународных изданиях. Обоснованность основных положений диссертации подтверждена на следующих международных и российских конференциях и форумах: IX международный технологический форум «Инновации. Технологии. Производство», г. Рыбинск, Россия, 20-21 апреля 2023; Двенадцатая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 24-27 сентября 2019 года; Десятая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 25-28 сентября 2017 года; Восьмая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 23-26 сентября 2015 года; Международная научно-техническая конференция «Инноватика в технологии конструкционных материалов», г. Москва, Россия, 27 марта 2014 года; Шестая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 25-28 сентября 2013 года; Четвертая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России», г. Москва, Россия, 29-30 сентября 2011 года.

### **СООТВЕТСТВИЕ СОДЕРЖАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ПАСПОРТУ СПЕЦИАЛЬНОСТИ, ПО КОТОРОЙ РЕКОМЕНДУЕТСЯ К ЗАЩИТЕ**

В работе решаются следующие теоретические и научно-практические задачи:

1) Проведение аналитических исследований методов и средств проектирования режущего рабочего инструмента механической фрезерной обработки металлических сплавов и изучение физико-механических свойств пластичных материалов.

2) Исследование схем и режимов резания пластичных материалов вращающимся инструментом.

3) Создание расчетно-графических моделей процесса фрезерной обработки пластичных материалов.

4) Разработка методики оценки силовых параметров процесса резания пластичных материалов концевыми фрезами.

5) Разработка средств алгоритмического и программного обеспечения методики расчета лезвийных параметров зубьев концевой фрезы.

6) Проведение сравнительных испытаний стойкости модернизированных концевых фрез в опытно-экспериментальном производстве.

Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» в части направления исследований:

пункт 1 - Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов (приспособлений, гидравлических узлов и т.д.), оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий;

пункт 2 - Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий;

пункт 4 - Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки;

пункт 6 - Новые технологические процессы механической и физико-технической обработки и создание оборудования и инструментов для их реализации.

### **ПОЛНОТА ИЗЛОЖЕНИЯ МАТЕРИАЛА ДИССЕРТАЦИИ В РАБОТАХ, ОПУБЛИКОВАННЫХ СОИСКАТЕЛЕМ**

Основное содержание диссертационной работы и ее результатов полностью отражены в 13 публикациях, подготовленных соискателем самостоятельно и в со-



авторстве, в том числе 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях ВАК, характеризующихся квантилями К1 и К3, две в рецензируемых изданиях научного цитирования Web of Science и Scopus, получены Свидетельство РФ на программу для ЭВМ и Патент РФ на полезную модель, изданы 4 доклада в сборниках трудов международных и всероссийских научно-технических конференций.

***Научные статьи, опубликованные в изданиях по Перечню ВАК***

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.

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.

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.

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.

5. Шапаровская (Леквеишвили), 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.

*Публикации в рецензируемых изданиях, включенных в индексируемые базы данных Web of Science и Scopus*

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 // *Metalls*. – 2023. – Vol. 13. – 1750:

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:

*Документы интеллектуальной собственности*

8. Леквеишвили, М. А. Программа расчета геометрии концевых фрез «EndMills»: свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ 2024614116 / А. Б. Люхтер, Л. Д. Оленин, М. А. Леквеишвили. - № 2024611548/69; заявл. 29.01.2024; зарегистр. 20.02.2024. – Текст : непосредственный.

9. 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.

*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.

11. Леквеишвили, М. А. О путях создания высокоэффективного режущего инструмента / Л. Д. Оленин, М. А. Леквеишвили. – 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.

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.

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).

#### ***Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации***

Считаем целесообразным продолжить научную работу в направлении исследований по повышению производительности и качества механической обработки специальных материалов и обеспечению технической и экономической эффективности процессов фрезерования. Необходимым условием при этом является цифровая информатизация процессов проектирования и создания режущих рабочих инструментов.

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы в адаптивных системах управления промышленным механообрабатывающим оборудованием, при проектировании технологии обработки заготовок резанием и конструировании металлорежущего инструмента, а также в процессе переподготовки кадров машиностроительных специальностей.

#### ***Замечания по диссертационной работе***

- 1) В работе не рассматривается влияние смазочно-охлаждающей жидкости на физико-химические процессы при резании.
- 2) Из текста диссертации не ясно, что понимается под пластичными металлическими материалами.
- 3) Предлагаемая методика расчета силовых параметров резания концевыми фрезами не учитывает влияние температурно-скоростного фактора на физи-

ко-механические характеристики обрабатываемого материала в процессе обработки.

4) Эксперименты по фрезерованию двузубой фрезой с целью определения экспериментальных значений для сопоставления их с расчетными данными проведены только на чистовых режимах.

5) Из диссертации не ясно, подходит ли предложенная методика проектирования для концевых фрез с количеством зубьев более двух.

## **ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ**

Диссертация Леквеишвили М. А. «Повышение износостойкости концевых фрез путем расчетно-экспериментального обоснования геометрических параметров режущей части инструмента» является законченной научной квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, и соответствует требованиям и критериям пунктов 6 и 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013г. №842 (с дополнительными изменениями от 20.03.2021г. №426).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых изданиях, в том числе внесенных в Перечень ВАК, и в сборниках трудов научных конференций. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Доклад соискателя по теме диссертации заслушан на расширенном заседании кафедры «Технология машиностроения» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (протокол от 19.06.2024г. №8).

Результаты диссертационного исследования характеризуются научной новизной и достигнутыми преимуществами и рекомендуются к защите по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Соискатель Леквешвили М.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.5 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

Отзыв составила:

Заведующая кафедрой «Технология машиностроения»  
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент

Ирина Игоревна Ведерникова

9.09.2024

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

Адрес: 153003, Центральный федеральный округ, Ивановская область, город Иваново, улица Рабфаковская, дом 34

Кафедра «Технология машиностроения»

Официальный сайт: <http://ispu.ru/>

Телефон: +7 (4932) 269-999; +7 (4932) 269-696

e-mail: [office@ispu.ru](mailto:office@ispu.ru)

Подпись И.И. Ведерниковой заверяю  
Ученый Секретарь ИГЭУ



Ю.В. Вылгина