

На правах рукописи



УМЕРОВ ЭРВИН ДЖЕВАТОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ
ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ
ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2022

Работа выполнена в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» на кафедре «Автомобильный транспорт».

Научный руководитель: **Абдулгасис Умер Абдуллаевич,**
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Автомобильный
транспорт» ГБОУ ВО РК «Крымский
инженерно-педагогический университет
имени Февзи Якубова»

Официальные оппоненты: **Янюшкин Александр Сергеевич,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения» ФГБОУ ВО
«Чувашский государственный
университет им. И.Н. Ульянова»

Дударев Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Инновационные технологии
машиностроения» ФГАОУ ВО «Пермский
национальный исследовательский
политехнический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский государствен-
ный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

Защита диссертации состоится 25 марта 2022 г. в 13⁰⁰, на заседании диссертационного совета 24.2.393.01 при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д.14, актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «СевГУ» и на сайте www.sevsu.ru.

Автореферат разослан «31» января 2022 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.393.01 Новикову Павлу Анатольевичу.

E-mail: PANovikov@sevsu.ru.

Тел.: 8(8692) 41-77-41 (доб. 1150).

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

Новиков Павел Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основной задачей машиностроения при обработке металлов резанием является совершенствование технологических процессов обеспечивающих наивысшую производительность обработки заготовок с требуемыми параметрами качества, определяемых запросами потребителя.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения выпуска машиностроительными предприятиями различных товаров народного потребления, изготовление которых требует высокую точность, производительность процесса обработки и экономическую эффективность. Значительное увеличение производства автотранспортных средств, сельскохозяйственной и бытовой техники невозможно без глубокой модернизации станкостроительной и смежных с ней отраслей.

Современное металлорежущее оборудование выполняет достаточно большое количество функций, характеризующихся быстродействием, непрерывностью рабочих циклов, сложностью, универсальностью и автоматизированностью процессов обработки.

Проблемы, связанные с обработкой заготовок на современном оборудовании целесообразно разделить на две группы.

Первая группа проблем связана изготовлением деталей из труднообрабатываемых конструкционных материалов, и тем, что окончательная обработка производится в основном без предварительных, черновых операций по снятию припуска, поскольку возросла возможность получения заготовок, максимально приближенных по форме и размерам к готовым деталям. Все это приводит к снижению точности и качества обрабатываемых поверхностей, которое в первом случае связаны с увеличением усилий и температуры в зоне резания, что ведет к повышенному износу режущего инструмента, а во втором к деформациям заготовки в процессе резания.

Вторая группа проблем связана с конструктивными особенностями обрабатываемых заготовок, которые имеют меньшую жесткость и виброустойчивость, обусловленных стремлением к снижению металлоемкости конструкций деталей.

Сложность формы и несимметричность профиля деталей, наличие ребер жесткости и перемычек, ведет к неравномерной их жесткости, вызывая тем самым неритмичные упругие деформации в процессе обработки, сопровождающиеся высокими температурами резания, растет вероятность коробления деталей.

Обработка материалов, поверхности которых имеют пересекающиеся полости приводит к ударным нагрузкам на режущий инструмент. В случае обработки заготовок из неоднородных материалов, со значительно отличающимися физико-механическими свойствами, нестабильностью характеристик инструмента и рядом других переменных факторов, сопровождается неравномерными относительными отжатыми инструмента и детали, неконтролируемыми изменениями силовой и тепловой нагрузки, высокими динамическими воздействиями на отдельные элементы

технологической системы, увеличением вибраций, снижением стойкости режущего инструмента, в особенности сверл, ведущих к нерациональному использованию их ресурса. Перечисленные конструктивные особенности деталей, сказываются на точности и качестве обработки.

Рассмотренные выше проблемы изготовления деталей машин значительно усугубляются на операциях сверления, относящийся к числу наиболее трудоемких технологических процессов, причем сверление является одной из самых распространенных среди других технологических операций, и которая не уступает по объему обработке наружных поверхностей, занимая в отдельных случаях до 40% от всего объема лезвийной обработки.

При сверлении отверстий, являющихся по функциональному назначению исполнительными поверхностями, необходимо обеспечить точность взаимного расположения их осей по отношению к наружным базовым поверхностям.

Недостаточная жесткость режущего инструмента, нестабильность протекания процесса резания из-за неоднородности физико-механических свойств обрабатываемого материала, сложные условия отвода образованной стружки, трудности подачи СОТС непосредственно в зону резания и возрастание температуры резания с увеличением глубины сверления, приводят к возникновению большого числа дефектов, увеличению процента брака, снижению производительности обработки и стойкости инструмента.

Поэтому одним из эффективных средств автоматизации сверления отверстий является управление режимами обработки в ходе операции на основе полученных данных о действительных условиях протекания процесса.

Особенно актуальна эта задача при сверлении конструкционных материалов спиральными сверлами, которые широко распространены, так как процесс сверления является основным при получении отверстий в сплошном материале.

Как правило, период стойкости режущего инструмента определяется временем, назначаемым по справочным данным в зависимости от обрабатываемого материала. По истечении этого времени производят переточку сверла или же его замену. При этом данные приведенные в справочных источниках справедливы для однородного материала для конкретных условий протекания процесса обработки. Из этого следует, что ресурс режущего инструмента может быть использован не рационально.

В связи с вышеизложенным процесс обработки сверлением предлагается производить непрерывно до достижения инструментом величины предельного износа. Это возможно путем корректирования режимов сверления по ходу протекания операции, при которых износ инструмента будет протекать таким образом, что позволит повысить и его стойкость, и производительность обработки.

Выше оговоренное предложение особенно может показать результативность при обработке таких труднообрабатываемых материалов как коррозионностойкие жаропрочные стали.

Следовательно, выявление возможностей повышения качества обработки, исследование влияния отдельных технологических факторов на характер протекания процесса, разработка и совершенствование методов и средств автоматизации и управления процессом сверления является актуальной задачей

в области автоматизации технологических процессов в машиностроении.

Для повышения эффективности процесса сверления необходимо разработать комплекс математических моделей, учитывающих изменение состояния технологической системы за период стойкости режущего инструмента. Этого можно достичь применением переменных режимов обработки по мере износа сверла и подачи в зону резания разработанных новых составов СОТС.

Совокупность выше оговорённых факторов ставит на данный момент задачу, решение которой позволит улучшить качество обработанной поверхности, уменьшить время обработки и повысить стойкость сверла.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в создание фундаментальных положений обеспечения точности и качества в теории резания, разработке новых способов активации и совершенствованию СОТС, используемых при лезвийной обработке заготовок, осуществлен в исследованиях: Ю.Н. Внукова, В.Н. Латышева, А.С. Верещаки, А.Д. Макарова, Л.В. Худобина, Ф. Якубова, Е.Г. Бердичевского, В.В. Маркова, А.Н. Резникова, А.Г. Суслова, В.А. Носенко, Ю.Г. Кабалдина, Е.С. Киселева, А.Г. Наумова, В.Н. Подураева, И.Д. Ахметзянова, М.И. Клушина, С.Г. Энтелиса, Э.М. Берлинера, Б. Ивковича, П. Барлоу, Ф. Боудена, Д. Тейбора, Е. Дойла, М. Мерчанта, Е. Хорла, Р.Н. Ошера и других. Исследования динамических процессов, происходящих в технологической системе при сверлении отверстий посвящены работы В.А. Кудинова, К.М. Костюкова, М.М. Тверского, Л.С. Мурашкина и других. Раскрытию особенностей процесса сверления глубоких отверстий, а также вопросам создания специализированного оборудования посвящены известные работы В.Л. Заковоротного, В.Н. Подураева, В.А. Остафьева, В.И. Закамалдина, В.А. Полетаева, И.Д. Румянцевой и других.

Исходя из разработанных математических моделей сверления обосновано теоретическое определение собственных частот колебаний системы и ее элементов с разработкой методов их подавления. При этом представленные модели не учитывают особенностей явлений, происходящих в зоне обработки и динамических свойств процесса резания, в частности поперечные смещения сверла. Как показал анализ научно-технической литературы, известные способы и методы по активации и разработке новых эффективных СОТС могут быть существенно доработаны. Неисследованным, незатронутым остается использование наноглинистых минералов листовой структуры в качестве присадки к масляным СОТС, с целью увеличения стойкости режущего инструмента и улучшения качества обработки поверхностей.

Известные математические модели моделирующие составляющие силы резания, температуру в зоне контакта, износ инструмента, его стойкость, производительность операции имеют ограниченную область применения, и не подходят для оптимизации построения граничных циклов сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей.

Целью диссертационной работы является повышение производительности операции сверления отверстий на основе разработки

комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных свёрл с материалом заготовки в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей.

Задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели:

1. Для установления взаимосвязей между входными и выходными переменными рассмотреть операцию сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей как динамическую систему.

2. Выявить и формализовать взаимосвязи между входными технологическими факторами и выходными параметрами процесса: с составляющими силы резания, температурой в зоне контакта, износом инструмента, его стойкостью, производительностью операции и показателями качества при сверлении отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей.

3. Разработать методики исследований и осуществить экспериментальную идентификацию разработанных моделей.

4. Разработать методику расчёта оптимальных по скорости съёма материала циклов сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей, с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости сверла.

5. Произвести оценку эффективности полученных результатов при опытно-промышленной эксплуатации.

Научная новизна определяется следующими положениями:

1. Установлены взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей, с учетом изменения состояния технологической системы с течением времени вследствие износа инструмента, что позволяет прогнозировать поведение технологической операции, при изменении режимов резания.

2. Разработаны методология построения предельных граничных циклов, реализующих максимально достижимую производительность сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей, спиральными свёрлами.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

– в повышении производительности процесса сверления и качества формируемых поверхностей путем использования математической модели сверления отверстий спиральными свёрлами, учитывающей поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе;

– в разработке комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных свёрл с материалом заготовки при введении в зону обработки масляных СОТС с наноглинистыми минеральными присадками;

– в предложенном новом составе масляной СОТС с улучшенными триботехническими свойствами (патент UA №82068 U) [11], снижающем энергозатраты и шероховатость обработанных поверхностей и повышающем стойкость сверла;

– в разработанной конструкции для определения коэффициента трения

смазочных материалов (патент RU №192398 U1) [12];

– в разработанном устройстве для подачи смазывающих технологических сред (патент RU №202898 U1) [13] в зону резания в виде аэрозоля, под давлением, поливом или свободно падающей струей в зависимости от требований технологической операции, одновременно позволяющий барботировать подаваемую СОТС.

Объект исследования – процесс сверления отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей.

Предмет исследования – закономерности процесса формирования отверстий в деталях из коррозионностойких жаропрочных сталей, спиральными сверлами с учетом изменения состояния технологической системы за период стойкости сверла.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследований служат фундаментальные и прикладные положения теории технологии машиностроения, сопротивления материалов, теории резания при лезвийной обработке и теории математического моделирования. Теоретические исследования, приведенные в диссертации, базируются на основах классической механики, системного и математического анализов, методах математической статистики, а также основаны на использовании математических методов обработки результатов экспериментов, правильности проведения теоретических и экспериментальных исследований с комплексом цифровой записи сигналов.

На основе теории резания и триботехнических особенностей механической обработки проведены теоретические исследования, которые были подтверждены экспериментальными испытаниями.

Личный вклад автора. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. Работы [5, 10] выполнены без соавторства. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в публикациях [1, 3, 9] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований; в работе [4] разработана математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла; в работе [6] предложена математическая модель силовой составляющей процесса сверления; в работах [7, 8, 14] подобрана присадка обладающая триботехническим эффектом и показан механизм проявления триботехнического эффекта НГМП в составе масляной СОТС; проведены экспериментальные исследования на операциях сверления, на которых проявляется триботехнический эффект в масляных СОТС при подаче их в зону резания [15, 16, 17]; выполнено моделирование оптимального состава наноглинистых минеральных присадок в составе СОТС [2]; в патентах [11-13] авторский вклад составляет 30%.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Структурная модель формирования оптимальной системы процесса сверления с учетом установления взаимосвязей между входными и выходными переменными, и алгоритм повышения производительности процесса сверления.

2. Математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные

в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе, составляющие силы резания, температуру в зоне контакта, износ инструмента, его стойкость, влияние наноглинистой присадки к масляной субстанции СОТС на производительность операции и показатели качества при сверлении отверстий в деталях из коррозионностойкой жаропрочной стали.

3. Результаты оптимизации технологической операции, позволяющие, повысить производительность сверления и увеличить стойкость инструмента в 1,4-2,9 раза в сравнении с существующими технологиями.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей и обоснованностью принятых допущений. Адекватность полученных результатов подтверждена корректным использованием современных методов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами внедрения в производство.

Основные положения и результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на научно-технических конференциях и семинарах, а именно на: XVI-XXI научно-теоретических конференциях профессорско-преподавательского состава и студентов ГБОУВО РК КИПУ (г. Симферополь, 2010 – 2019 гг.), Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прогрессивные направления развития машино-приборостроительных отраслей и транспорта» (г. Севастополь, 2012 и 2014 гг.); Международной научно-технической конференции «Инновационные материалы и технологии: Достижения. Проблемы. Решения» Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, (г. Комсомольский-на-Амуре, 2013 г. (заочно); Седьмой конференции молодых ученых и специалистов – «Сверхтвердые, композиционные материалы и покрытия: получение, свойства, применение» (пгт. Морское, 2013 г.); Международной научно-методической конференции «Проблемы подготовки кадров автомобильной отрасли и пути их решения». (г. Харьков, 2013 г.); XXI Международной научно-техническом семинаре «Высокие технологии: тенденции развития» (г. Харьков, НТУ «ХПИ» 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2015-2020 гг.).

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы, в частности, применение математической модели сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающей износ режущих кромок, граничные циклы управления процессом сверления с подачей в зону резания масляной СОТС с добавками наноглинистых минералов внедрены в производство на завод АО «Пневматика» (г. Симферополь), ФГБУН «НИИСХ Крыма» (г. Симферополь) и в учебный процесс двух кафедр – технологии машиностроения и автомобильного транспорта Государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова».

Публикации. Основное содержание работы отражено в 17 научных работах, из которых 6 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в

перечень ВАК РФ; 4 – в зарубежных изданиях, входящих в базу данных Scopus, получены три патента на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 126 наименований, 8 приложений с патентной документацией и актов внедрения результатов работы. Работа изложена 167 страницах машинописного текста, включает 59 рисунков и 12 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, определена научная новизна, практическое значение и ценность полученных результатов, перечислены основные положения, выносимые на защиту, дана оценка степени достоверности проведенных исследований, представлена апробация полученных результатов.

Первая глава посвящена анализу состояния исследования по теме и постановкам задач, решение которых необходимо для достижения цели исследований. Приведен аналитический обзор теорий трения и изнашивания лезвийного режущего инструмента. Показаны различные взгляды на физическую сущность трения в процессе резания материалов.

Приведенный анализ известных математических моделей показал, что имеющиеся зависимости охватывают только часть проблемы повышения точности, выдержки формы отверстия и качества ее поверхности. Целесообразна разработка математических моделей, более широко охватывающих технологические системы сверления отверстий, с учетом особенностей подачи СОТС и их состава. Кроме того, вопросы обеспечения повышения производительности процесса сверления недостаточно изучены и требуют дальнейшей детальной проработки.

Большой вклад в исследование теорию и процесс резания внесли следующие учёные: Ю.Н. Внуков, В.Н. Латышев, А.С. Верещака, А.Д. Макаров, Л.В. Худобин, Ф. Якубов, А.Г. Наумов, А.Г. Суслов, Е.С. Киселев, В.В. Марков, А.Н. Резников и другие. Исследованиями динамических процессов, происходящих в технологической системе при сверлении отверстий посвящены работы В.А. Кудинова, К.М. Костюкова, М.М. Тверского, Л.С. Мурашкина и других ученых. Однако данные работы не позволяют в полной мере учесть особенности физико-механических свойств обрабатываемых материалов. Несовершенство существующих методов расчета режимов обработки, нестабильность характеристик инструмента и их изменение в процессе резания при обработке с заранее запрограммированным режимом приводят к изменениям тепловой, силовой нагрузки на инструмент и к его нерациональному использованию. Влияние указанных недостатков возрастает при использовании инструмента, параметры которого ограничены условиями обработки (прочность, жесткость, износостойкость и т.д.). Особенно четко эти недостатки проявляются на операциях обработки отверстий спиральными сверлами.

Таким образом, для повышения производительности процесса сверления

при обработке коррозионностойкой жаропрочной стали необходимо дальнейшее совершенствование процессов сверления с разработкой комплекса технических решений, обоснованных анализом и изучением особенностей взаимодействия формообразующих элементов спиральных сверл с материалом заготовки при введении в зону обработки масляных СОТС.

Во второй главе диссертации посвящено математическому моделированию процессов взаимодействия формообразующих элементов спиральных сверл с материалом заготовки с учетом упругих деформаций инструмента.

На основе системного подхода процесс сверления рассмотрен как динамическая система. При структурном анализе произведена декомпозиция системы процесса сверления по функциональным признакам на подсистемы станка, приспособления, инструмента, заготовки, СОТС, зоны контакта.

Определены входные и выходные переменные, а также параметры состояния каждой из подсистем. Установлено, что параметры технологической системы могут изменяться с течением времени предсказуемым и непредсказуемым образом под действием различных факторов.

Показано влияние деформаций рабочей части сверл на точность отверстий. При сверлении на поверхности зубьев со стороны обрабатываемого материала действуют силы сопротивления резанию. В результате поперечные сечения рабочей части сверла закручиваются относительно поперечного сечения хвостовика, расположенного в плоскости его защемления.

Для оценки точности отверстий, предположим, что на сверло, оказывают воздействия крутящий момент $M_{кр} = P_z r$ и продольные сжимающие силы P_x , в двух взаимно перпендикулярных плоскостях прямолинейный стержень изгибается поперечными силами P_{yy} и P_{yz} и изгибающими моментами M_z и M_y , построена расчетная схема (рисунок 1) на основании которой, из условия равновесия правой части в сечении с координатой x получена система дифференциальных уравнений изогнутой оси сверла в двух взаимно перпендикулярных плоскостях:

$$\begin{cases} EJ_z \frac{d^2 y(x)}{dx^2} = -M_{кр} \cdot \frac{dz(x)}{dx} + P_x \cdot (y_0 - y(x)) + M_z + P_{yy} x \\ EJ_y \frac{d^2 z(x)}{dx^2} = M_{кр} \cdot \frac{dy(x)}{dx} + P_x \cdot (z_0 - z(x)) + M_y + P_{yz} x \end{cases} \quad (1)$$

где EJ_y, EJ_z – изгибная жесткость стержня сверла в поперечном сечении; $M_{кр}$ – крутящий момент;

$\frac{dz(x)}{dx}$ и $\frac{dy(x)}{dx}$ – коэффициент, учитывающий изгиб стержня сверла под действием силы; P_x – продольная сжимающая сила; $(y_0 - y(x)), (z_0 - z(x))$ – прогиб сверла; $M_z(x)$ и $M_y(x)$ – изгибающие моменты в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в сечении с координатой x соответственно; P_{yy}, P_{yz}, P_x – составляющие силы резания.

Решение системы (1) и последующие расчеты позволили установить для обработки отверстий в деталях из стали 12Х18Н10Т, что погрешность, возникающая за счет деформации сверла, для отверстий диаметром 3-6 мм составляет 2,1 мкм/мм, Ø 6-10 мм – 1,7 мкм/мм, Ø 10-18 – 1,3 мкм/мм, Ø 18-30 – 0,9 мкм/мм.

По полученным формулам можно выполнять расчёты для вновь проектируемых и действующих технологических процессов.

$$P_Y = \left(\frac{a \cdot \sin \beta}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{\mu K}{3} \cdot \frac{C_h V_p \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \times \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) b \tau_s. \quad (4)$$

где P_Z и P_Y – тангенциальная и радиальная силы резания соответственно; a – толщина среза (см. рисунок 2); β – угол между вектором скорости резания и равнодействующей силы резания R ; β_1 – угол между вектором скорости резания и плоскостью сдвига; K – коэффициент усадки стружки, примерно равное отношению нормальных к касательным напряжениям (σ/τ_s); C_h – безразмерная переменная, зависящая от материала контактирующих тел; V_p – скорость резания; τ – время работы инструмента; σ_{cp} – средние нормальные напряжения; A , α_k – экспериментально определяемые переменные; α_T – коэффициент температуропроводности материала заготовки; N_p – мощность резания; λ_n – коэффициент теплопроводности материала; S_k – площадь теплового потока; b – длина режущих кромок сверла; α – задний угол; γ – передний угол.

Полученные зависимости (3) и (4) позволяют вести расчет сил резания в зависимости от диаметра сверла, величины подачи, обрабатываемого материала, учитывающие износ инструмента во времени.

Рассмотрев теплофизическую модель контактного взаимодействия при резании с подачей разработанной масляной СОТС, установлены закономерности изменения энтальпии присадки наноглинистого минерала (НГМП) от температуры СОТС и ее влияние на снижение температуры в зоне резания. Получены математические выражения, позволяющие осуществлять расчет температур в зоне контакта, за период стойкость инструмента зависимости для расчёта составляющих сил резания, учитывающее износ режущих кромок сверла.

$$T = \left[\left(\frac{a \cdot \cos \beta \cdot V_p}{\sin \beta_1} \sqrt{(1+K^2)} + \frac{K}{3} \cdot \frac{C_h V_p^2 \tau \sigma_{cp}}{Ae^{-2\alpha_k \frac{\alpha_T N_p}{S_k \lambda_n} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot \tau}{\pi}}}} \cdot \left(\frac{1 - \operatorname{tg} \gamma \cdot \operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \right) \frac{b \tau^2}{M \cdot C} - \frac{M_k \cdot f_{вл} \cdot \Delta H \cdot \theta}{M \cdot C} \right] \times (1 - \exp(-\theta \tau)). \quad (5)$$

где M_k – масса НГМП введенная в СОТС; ΔH – энтальпия дегидратации присадки; $f_{вл}$ – коэффициент влажности присадки; C – удельная теплоемкость СОТС.

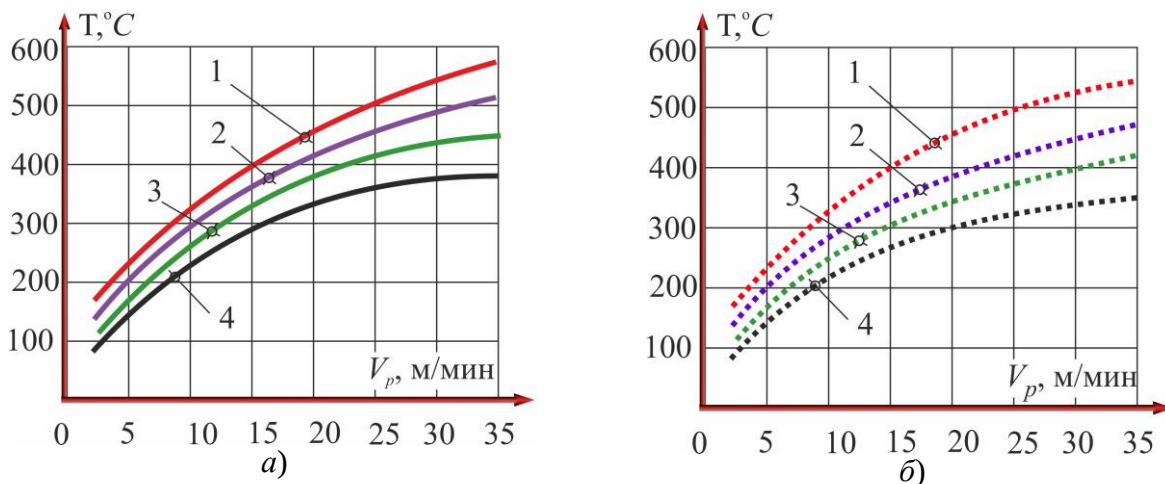


Рисунок 3. Влияние скорости резания и различных составов СОТС на температуру резания:

а) сталь 12X18H10T; б) сталь X18H10, 03X18H11;

1 – минеральное масло И-20А; 2 – минеральное масло И-20А с НГМП;

3 – подсолнечное масло; 4 – подсолнечное масло с НГМП.

Полученное выражение (5) отражает влияние теплофизических и гидродинамических свойств смазки на процесс резания. Численное значение теоретической зависимости (5) для операции сверления в зависимости от скорости резания V_r при обработке коррозионностойких жаропрочных сталей различных марок и подаче различных видов СОТС, результаты которого представлены на рисунке 3. Проверка адекватности полученных зависимостей выполнялась путем сравнения теоретических зависимостей с экспериментальными данными.

Третья глава диссертации посвящена разработке параметрических зависимостей модели и экспериментальным исследованиям процесса сверления. Разработаны методики и конструкции экспериментальных стендов для исследования процессов сверления, позволяющие изучать обработанные поверхности с учетом изменения геометрии режущих кромок инструмента за период стойкости сверла, оценивать и контролировать составляющие силы резания, и температуру в технологической системе.

Исследовано силовое взаимодействие процесса сверления (рисунок 4) с подачей СОТС при обработке заготовки из стали 12Х18Н10Т спиральными сверлами диаметром 22 мм с течением времени, с целью проверки адекватности полученных в главах 2 и 3 аналитических зависимостей и стойкости режущего инструмента. Для определения температуры в зоне резания были проведены эксперименты по замеру температуры в идентичных условиях при каждом виде подаваемой СОТС, результаты которых представлены на рисунке 5.

Как видно из рисунка 5, температура при «сухом» резании по мере заглубления сверла нарастает и достигает максимальных значений. Аналогичное явление наблюдается и при подаче масла И-20А с НГМП. При подаче же экспериментальной СОТС (подсолнечного масла с НГМП) температура плавно возрастает и стабилизируется по мере заглубления сверла в заготовку.

Значения, полученные в результате расчета предельного износа спиральных сверл от режимов обработки приведены на рисунке 6. Значения предельного износа инструмента независимо от подачи увеличиваются с ростом скорости. Увеличение подачи приводит к снижению значений предельного износа. При подачах от 0,125 до 0,35 мм/об зависимость носит линейный характер, при подаче 0,076 мм/об она близка к линейной.

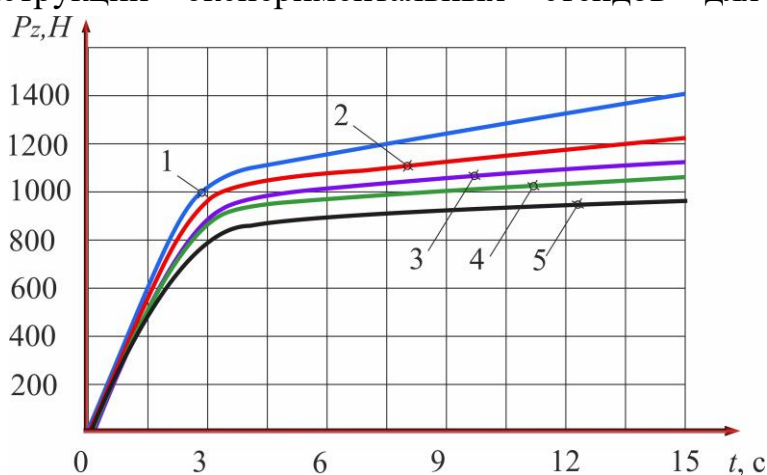


Рисунок 4. Зависимость тангенциальной силы резания P_z при сверлении стали 12Х18Н10Т в условиях подачи различных СОТС:

Режимы резания: $V = 11$ м/мин; $S = 0,076$ мм/об.
Расход СОТС 0,5 л/мин. Режущий инструмент Р6М5.
1 – «сухое резание»; 2 – минеральное масло И-20А;
3 – минеральное масло И-20А с НГМП;
4 – подсолнечное масло;
5 – подсолнечное масло с НГМП.

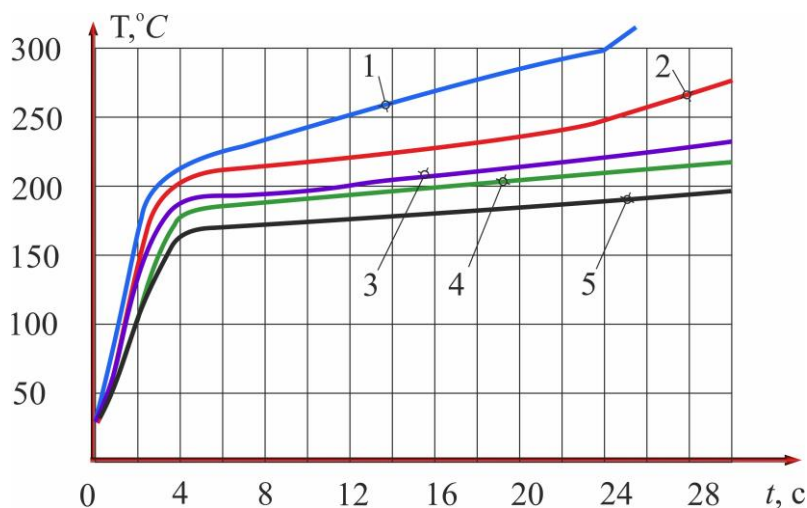


Рисунок 5. Зависимость температуры режущих кромок сверла от времени при подаче различных СОТС:
 Режимы резания: $V = 11$ м/мин;
 $S = 0,076$ мм/об.
 Расход СОТС 0,5 л/мин.
 Режущий инструмент Р6М5.
 1 – «сухое резание»;
 2 – минеральное масло И-20А;
 3 – минеральное масло И-20А с НГМП;
 4 – подсолнечное масло;
 5 – подсолнечное масло с НГМП.

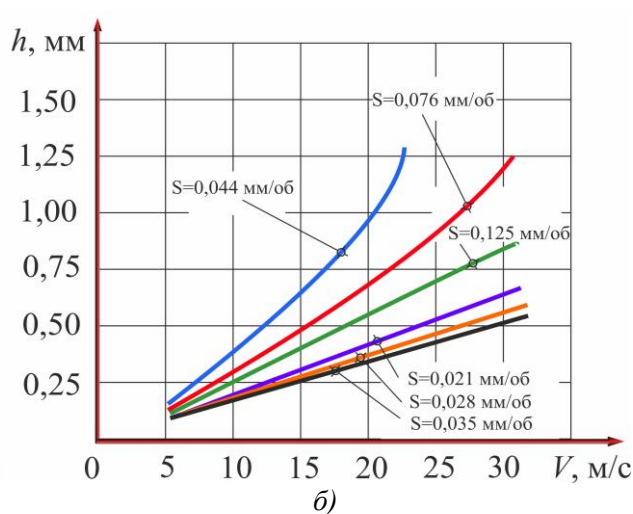
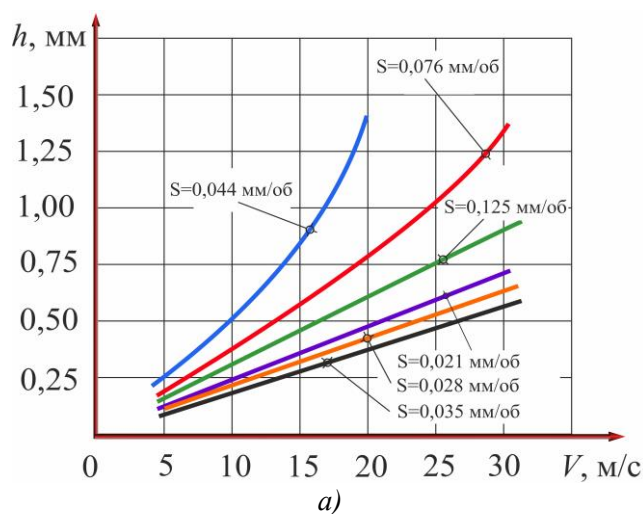


Рисунок 6. Зависимости предельного износа спиральных сверл диаметром 22 мм от режимов обработки стали 12Х18Н10Т:
 а) подача СОТС по каналам сверла; б) подача СОТС поливом.

При этих подачах предельный износ инструмента не зависит от способа подвода СОТС в зону резания. При подаче 0,044 мм/об, зависимость предельного износа приобретает нелинейный характер от скорости резания и значения предельного износа увеличиваются при подаче охлаждения по внутренним каналам сверла.

На рисунке 7 представлены зависимости развития среднего износа задней поверхности и износа у уголков от суммарной глубины просверленных отверстий при различных скоростях резания.

Из полученных зависимостей видно, что износ по задней поверхности у уголков значительно превосходит средний износ. Кроме того, значение этого износа, соответствующее началу катастрофического износа в 3 – 4 раза превосходит нормативные данные. Это говорит о том, что смена инструмента при достижении нормативных критериев притупления приводит к неполному использованию срока службы сверла (на 50 % и более).

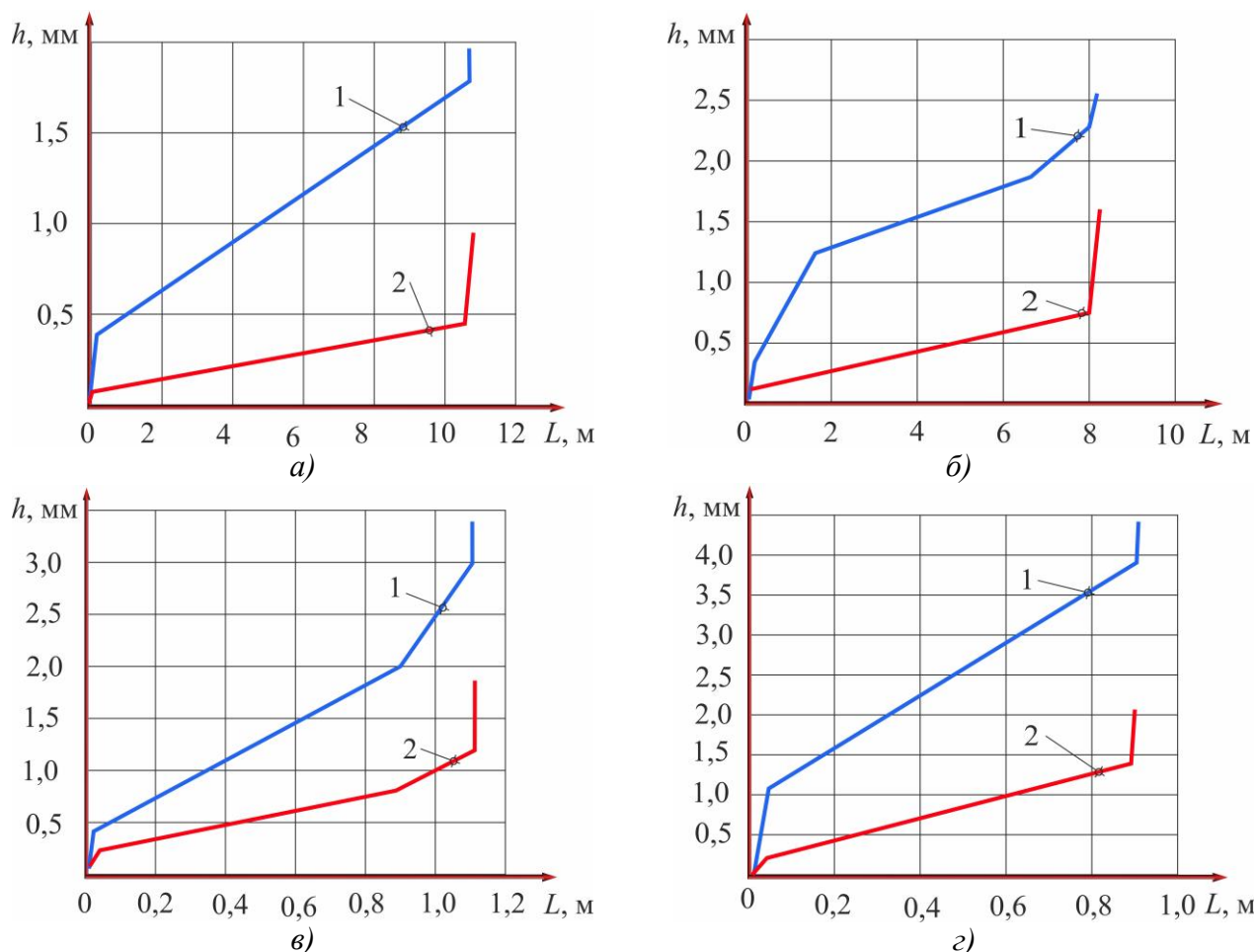


Рисунок 7. Зависимость среднего износа по задней поверхности сверла и износа у уголков от суммарной глубины отверстий при сверлении:
 1 – износ у уголков; 2 – средний износ по задней поверхности;
 а) $V = 11$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.; б) $V = 21$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.;
 в) $V = 31$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.; г) $V = 41$ м/мин и $S = 0,076$ мм/об.

На рисунке 8 представлены результаты износа спиральных сверл в зависимости от подачи различных видов СОТС при обработке стали 12Х18Н10Т. За критерий износа была принята величина $h_3 = 0,35$ мм.

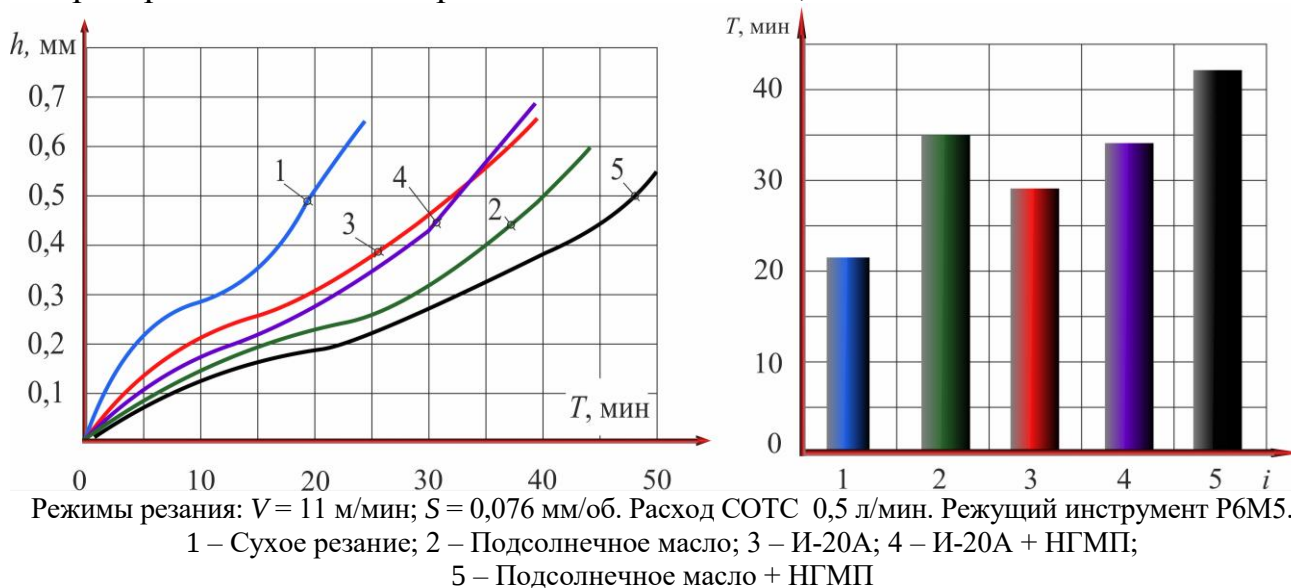


Рисунок 8. Влияние различных составов СОТС на износ задней поверхности и стойкость сверла из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке стали 12Х18Н10Т.

Зависимости предельного износа инструмента от скорости резания, полученные экспериментально, носят одинаковый характер с теоретическими зависимостями. Сравнение экспериментально полученных и расчетных значений предельного износа инструмента показало хорошее их совпадение.

Таким образом, выполненный статистический анализ показал достаточную точность разработанных моделей расчета сил резания, температуры и износа с учетом переменных факторов при обработке партии деталей. Экспериментальная проверка подтвердила адекватность разработанных моделей.

Четвертая глава посвящена расчету граничных циклов управления операцией сверления.

Оптимизация циклов управления величиной осевой подачи и скорости резания проведена с учетом основных технических ограничений функции оптимизации, связанным с техническими требованиями на деталь (точность, шероховатость), конструктивными параметрами станка (диапазоны параметров режимов резания, податливость ТС), характеристикой сверла (износ режущих кромок). Для обеспечения стабильности требуемых параметров качества обрабатываемой поверхности отверстий при сверлении партии деталей, необходимо разработать оптимальный цикл управления операцией сверления, учитывающий изменение состояния технологической системы за счет износа режущих кромок сверла за период стойкости.

Таким образом, управляя процессом резания путем изменения величины подачи и скорости резания, можно сместить величину предельного износа инструмента в сторону увеличения. Это в свою очередь позволит увеличить стойкость режущего инструмента.

Для экспериментальной проверки методики оптимизации циклов величиной подачи и скорости резания, сравнивались качества поверхностей обработанных отверстий по существующей и предлагаемой технологиям при сверлении партии деталей из 30 штук с целью учета нестабильных условий сверления, имеющих место при обработке партии деталей.

Проверка адекватности предложенной методики граничных циклов управления осевой подачи и скорости резания выполнялась путем сравнения существующей и предлагаемой технологиям (таблица 1).

Таблица 1

Сравнительные результаты качества поверхностей обработанных отверстий по существующей и предлагаемой технологиям.

По заводской технологии						
№ партии	Округлость сечения – Δ , мкм			Погрешность диаметра – Δ_d , мкм		
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	25	10	6,25	52	30	13,44
2	23	9	5,44	49	22	20,25
3	24	12	4,0	51	28	14,69
Σ_i	24	10,33	5,23	50,68	26,67	16,13

По предлагаемой технологии						
	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²	max	min	Дисперсия σ^2 мкм ²
1	20	9	3,36	45	29	7,11
2	14	5	2,25	42	21	12,25
3	19	8	3,36	43	21	13,44
Σ_j	17,67	7,33	2,99	43,33	23,67	10,935
$\frac{\Sigma_i}{\Sigma_j}$	1,35	1,41	1,75	1,17	1,13	1,47

Результаты проведенных экспериментальных исследований подтвердили эффективность разработанных циклов, а также возможность использования разработанной методики проектирования циклов управления осевой подачей и скоростью резания на операциях сверления.

Все детали, просверленные по оптимальному циклу управления на станках с ЧПУ, по шероховатости поверхности, допуску на изготовление, отклонениями от округлости соответствовали требованиям технологической документации, при обработке партии заготовок с учетом реального изменения переменных технологических факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе обосновано теоретическое решение задачи, имеющее важное значение для машиностроения, а именно разработана методология повышения эффективности обработки отверстий спиральными сверлами, включающая производительность, экономичность, точность и качество обрабатываемых поверхностей на основании реализации теории и технологии управления операцией сверления.

2. На основании положений теории резания и теории износа режущего инструмента разработана математическая модель сверления отверстий спиральными сверлами, учитывающая поперечные смещения сжато-закрученного сверла и их производные в двух главных центральных плоскостях при продольно-поперечном изгибе и получены аналитические зависимости, позволяющие вычислять составляющие силы резания, учитывающие износ режущих кромок сверла. Установлены закономерности изменения энтальпии присадки наноглинистого минерала от температуры СОТС и ее влияние на снижение температуры в зоне резания.

3. Решен комплекс задач, связанных с повышением точности и качества обработки отверстий на операциях сверления, получены расчетные зависимости, позволяющие прогнозировать погрешность обработки отверстия для заданных циклов управления скоростью резания и величиной подачи с учетом нестационарности технологического процесса.

4. Разработаны алгоритм и методика расчета граничных циклов управления осевой подачей и скоростью резания на операциях сверления, позволяющие повысить производительность при заданном качестве поверхностей обработанных деталей.

5. Разработаны практические рекомендации по повышению производительности, обеспечению точности и качества поверхностей обрабатываемых отверстий на операциях сверления. В процессе реализации предложенной методики на операциях сверления, направленной на решение рассматриваемых задач, достигнут эффект существенного повышения производительности (в среднем на 20% относительно существующего технологического процесса) с обеспечением заданной точности и качества поверхности отверстия, что подтверждается результатами промышленного внедрения на следующих предприятиях: завод АО «Пневматика» (г. Симферополь), ФГБУН «НИИСХ Крыма» (г. Симферополь), а также в учебный процесс ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова».

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. Абдулгазис Д.У. О возможности формирования эндотермических и улучшения триботехнологических свойств масляных СОТС присадкой наноглинистых минералов листовой структуры / Д.У. Абдулгазис, **Э.Д. Умеров** // Известия Волгоградского технического университета. Серия: «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. №5(184). 2016. – С. 7-11.

2. **Умеров Э. Д.** Моделирование оптимального состава наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС / **Э.Д. Умеров**, А.М. Сухтаева, Д.Д. Гельфанова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Вып. 8: в 2 ч. Ч. 2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. – С. 169-175.

3. Абдулгазис Д.У. Анализ математических моделей технологического процесса сверления, описывающих аспекты обеспечения качества обработки / Д.У. Абдулгазис, **Э.Д. Умеров**, У.А. Абдулгазис // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(60), 2018. – С.200-204.

4. Сидоров Д.Е. Влияние деформаций рабочей части спирального сверла на точность отверстий / Д.Е. Сидоров, **Э.Д. Умеров** // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 1(63), 2019. – С. 267-273.

5. **Умеров Э.Д.** Использование системного подхода при моделировании технологического процесса сверления / **Э.Д. Умеров** // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(64), 2019. – С.271-275.

6. Братан С.М. Математическая модель силовой составляющей процесса сверления, учитывающая её изменение во времени / С.М. Братан, П.А. Новиков., **Э.Д. Умеров** // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ имени Февзи Якубова, № 3(69), 2020. – С.212-219.

Публикации в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science

7. Abdulgazis D. Development of Endothermic Properties and Improvement of Tribotechnological Properties in Oil Cutting and Cooling Lubricants / Dilyaver Abdulgazis, **Ervin Umerov**, Umer Abdulgazis // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017. Procedia Engineering Volume 206 (2017). – P. 1503–1507. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.669>.

8. Abdulgazis D. Improvement of tribotechnological properties of oil-based cutting fluids by adding dry lubricants / Dilyaver Abdulgazis, **Ervin Umerov**, Umer Abdulgazis // MATEC Web of Conferences Volume 129, 01068 (2017). *ICMTMTE 2017*. DOI: 10.1051/mateconf/201712901068.

9. Abdulgazis D. Analysis of mathematical models of drilling describing surface quality and tool overload protection aspects / Dilyaver Abdulgazis, **Ervin Umerov**, Umer Abdulgazis // MATEC Web of Conferences 224, 01126 (2018) *ICMTMTE 2018*.

doi.org/10.1051/mateconf/201822401126.

10. **Umerov E.D.** Application of system approach to drilling process simulating / **E.D. Umerov** // Materials Today: Proceedings Volume 38, 2021. Pages 1824–1826. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.428>.

Патенты

11. Патент на полезную модель №82068 (Украина), МПК C10M 173/00 (2013.01). Смазочно-охлаждающее технологическое средство / **Умеров Э.Д.**, Абдулгазис У.А., Подзноев Г.П., Абдулгазис Д.У., Ягьяев Э.Э. // Заявители и патентообладатели – авторы. Заявка № u2012 13241; заявл. 20.11.2012; опубл. 25.07.2013. Бюл. №14.

12. Патент на полезную модель №192398 РФ, МПК G01N 19/02. Устройство для определения коэффициента трения смазочных материалов / **Умеров Э.Д.**, Скакун В.В., Абдулгазис У.А., Ягьяев Э.Э.; заявители и патентообладатели – авторы. – Заявка №2019106941; заявлено 13.03.2019; опубл. 16.09.2019, Бюл. №26.

13. Патент на полезную модель №202898 РФ, МПК B05D 1/02. Устройство для подачи смазывающих технологических сред / Скакун В.В., Джемалудинов Р.М., **Умеров Э.Д.**; заявители и патентообладатели – авторы. – Заявка №2020132424; заявлено 29.09.2020; опубл. 12.03.2021, Бюл. №8.

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

14. Абдулгазис Д.У. Улучшение теплофизической обстановки в зоне резания при сверлении за счет эндотермических возможностей наноглинистых минеральных присадок к масляным СОТС / Абдулгазис Д.У., **Умеров Э.Д.**, Абдулгазис У.А. // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета, РИО КИПУ № 2(56), 2017. – С.63-69.

15. **Умеров Э.Д.** Влияние наноглинистой минеральной присадки к масляной СОТС на формирование стружки и качество обработанной поверхности при сверлении конструкционных сталей / **Э.Д. Умеров**, Д. У. Абдулгазис, У. А. Абдулгазис // Сборник статей «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении. Севастополь 2015»: материалы Международной научно-технической конференции 14-15 сентября 2015 г. – Севастополь: ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2015. – С. 73-79.

16. **Умеров Э.Д.** Повышение стойкости режущего инструмента применением экологически безопасных присадок к масляным СОТС с эндотермическими и триботехнологическими свойствами / **Э.Д. Умеров**, Д.У. Абдулгазис, У.А. Абдулгазис // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сборник статей Всероссийской заочной научно-практической конференции с международным участием. / ФГАОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т». Екатеринбург, 2015. – С.24-31.

17. **Умеров Э.Д.** Влияние на коэффициент трения присадки к масляной субстанции СОТС в виде наноглинистого минерала / **Э.Д. Умеров**, Ш.Т. Мевлют, Д.У. Абдулгазис, У.А. Абдулгазис // Вестник современных технологий. Издательство: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет" (Севастополь). – №2(18), – 2020. – С.4-9.

Умеров Эрвин Джеватович

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОЦЕССА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ДЕТАЛЯХ ИЗ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ЖАРОПРОЧНЫХ СТАЛЕЙ СПИРАЛЬНЫМИ СВЕРЛАМИ

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.393.01
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (протокол № 29 от 25.01.2022 г.)

Формат 60×84^{1/16}. Бумага офсетная. Гарнитура TimesNewRoman.

Печать цифровая. Тираж 100 экз. Заказ №136.

ИП Хотеева Л.В., 295015, Республика Крым, г. Симферополь, пер. Учебный, д. 8.

Свидетельство о государственной регистрации

серии 91 №000206511 от 23.12.2015 г.

Тел.: +7(978)8342579, v.buber@mail.ru