

На правах рукописи



Репин Денис Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ ПУТЕМ
ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ
СОТС С КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИМИ ПОЛИМЕРНЫМИ
ПРИСАДКАМИ**

Специальность 2.5.5 Технология и оборудование
механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2025

Работа выполнена на кафедре высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН».

Научный руководитель: **Мигранов Марс Шарифуллович**
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры высокоэффективных технологий обработки федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва

Официальные оппоненты: **Носенко Владимир Андреевич**
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология и оборудование машиностроительных производств», Волжского политехнического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», г. Волжский

Рыкунов Александр Николаевич
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационное машиностроение» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 01 июля 2025 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 при ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский пер., д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» и на сайте: <https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/repin-denis-sergeevich/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

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

Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях современного машиностроительного производства, одним из наиболее эффективных методов увеличения производительности механической обработки материалов и улучшения показателей качества обработанной поверхности с минимальными затратами на капитальное вложение является разработка и внедрение в технологический процесс доступного и экономически обоснованного способа – это применение инновационных высокопроизводительных смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС).

В современном машиностроительном производстве, в условиях необходимости значительной интенсификации процесса обработки резанием, внедрения и применения высокоскоростного металлообрабатывающего оборудования с уникальными мехатронными системами, укомплектованные инновационными металлорежущими инструментами для обеспечения высоких показателей качества обработанной поверхности (шероховатость, микротвердость, остаточные напряжения и т.д.) по-прежнему остро стоит вопрос разработки и обеспечения эффективными марками СОТС, и с последующей возможностью улучшения их эксплуатационных свойств, путем дополнительных воздействий для активационных и модифицирующих их процессов.

Большая группа различных видов присадок используются и оказывают благоприятное воздействие не только температурно-силовым, контактным процессам в зоне резания, но и благодаря глубокому и многостороннему взаимодействию на микро- и наноуровне с поверхностями обрабатываемого материала и режущего клина инструмента способствуют повышению износостойкости и улучшению показателей качества обработанной поверхности детали.

Из анализа результатов исследований по данной тематике следует отметить современное направление по использованию в качестве эффективных присадок к СОТС полимерных соединений в виду их качественных и отличительных свойств по сравнению с традиционно известными и используемыми. В тоже время, применение известных физических методов активации СОТС, в том числе, содержащих полимерные присадки, может оказывать синергетический эффект на процесс механической обработки металлов резанием, что проявляется в повышении износостойкости режущего инструмента, улучшение показателей качества обработанной поверхности и т.д.

Настоящая диссертационная работа посвящена исследованию влияния активированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС на процесс обработки металлов резанием.

Степень разработанности. Изучению физико-химических взаимодействий между инструментом и обрабатываемым материалам при наличии внешней среды посвящены работы таких ученых, как: Г.П. Виноградова, А.С. Ахматова, П.А. Ребиндера, М.И. Клушина, В.Н. Латышева, Л.В. Худобина, А.Г. Наумова, В.В. Маркова, Дж.А. Уильямса, Д. Тейбора и многих других исследователей. Анализ литературных данных и опыта производственного применения СОТС

показал, что исследования проявления различных эффектов и их возможность положительного влияния на обрабатываемость металлов резанием, в частности пластифицирования и охрупчивания, сформулированных академиком П.А. Ребиндером, а также вероятность протекания тех или иных химических или физических процессов с позиций теории радикально-цепных реакций В.Н. Латышева требуют систематизации и дальнейшего развития в научно – исследовательских работах. При этом в работах В.Н. Латышева, Л.В. Худобина, А.Г. Наумова, В.В. Маркова, А.С. Верещаки, М.Ш. Мигранова и др. показан положительный эффект от применения различных методов активации смазочно-охлаждающих жидкостей при обработке различных металлов.

В соответствии с этим, проведение исследований с целью дальнейшего развития представлений о физико-химических явлениях, протекающих в зоне контакта, в условиях воздействия активированных СОТС, является актуальной задачей.

Цель работы. Повышение эффективности лезвийной обработки резанием при применении СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками путем их активации коронным разрядом.

Задачи исследования:

1. Изучить механизмы влияния и эффективности применения активированных СОТС с полимерными присадками на износостойкость, температурно – силовые условия при лезвийной обработке резанием.

2. Выполнить термоактивационное описание эффективности применения полимерсодержащих СОТС.

3. Применить выявленные эффекты действия активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при резании различных групп металлов по обрабатываемости в широком диапазоне изменения элементов режима резания.

4. Разработать оптимальные составы СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками и рациональные режимы их использования.

5. Провести серии экспериментальных испытаний по оценке влияния активированных полимерсодержащих СОТС на износостойкость режущего инструмента и на показатели качества обработанной поверхности при лезвийном резании различных сталей и сплавов по обрабатываемости.

6. Разработать, на основе регрессионного анализа, математическую модель зависимости показателей работоспособности (период стойкости) режущего инструмента от параметров резания при точении и сверлении с использованием СОТС для прогнозирования их эффективности.

7. Выполнить оценку экономической эффективности применения активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками с последующей разработкой принципов их выбора и рекомендацией по использованию в производственных условиях.

Объектом исследования является процесс лезвийной обработки резанием с применением СОТС. Металлорежущий инструмент и его эксплуатационные свойства при точении, сверлении.

Предметом исследования являются разработка принципов выбора и применения, активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками.

Научная новизна:

1. Разработана и предложена термоактивационная схема процесса протекания радикально-цепных реакций при использовании в качестве компонентов СОТС кислородсодержащих полимерных присадок.

2. Выявлены закономерности влияния коронного разряда при активации СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками на основные показатели эффективности лезвийной обработки резанием.

3. Разработана теоретическая модель образования комплексов радикалов кислородсодержащих полимерных присадок в СОТС на ювенильных металлических поверхностях в контактной зоне резания под воздействием коронного разряда.

4. Определены условия минимизации интенсивности износа режущего инструмента и обеспечения требуемых показателей качества обработанной поверхности при применении кислородсодержащих полимерных присадок в СОТС с последующей их активацией коронным разрядом.

Теоретическая значимость диссертации заключается в разработке теоретической модели образования комплексов радикалов кислородсодержащих полимерных присадок в СОТС на ювенильных металлических поверхностях в контактной зоне резания под воздействием коронного разряда.

Практическая значимость:

1. Определена оптимальная (рациональная) концентрация кислородсодержащих полимерных присадок в используемой эмульсии, обеспечивающая уменьшение интенсивности износа режущего инструмента за счет снижения влияния температурно-силовых факторов.

2. Определены и изучены физико-химические свойства предлагаемых смазочных материалов при эффективном режиме применения ионизатора-озонатора с требуемыми концентрациями поверхностно-активных присадок на операциях точения и сверления.

3. Определены режимы активации коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками. При этом установлено, что исследуемые СОТС улучшают показатели эффективности лезвийной обработки резанием различных металлов (период стойкости, шероховатость и т.д.).

4. Проведена производственная апробация и результаты работы внедрены на промышленных предприятиях АО УАП «Гидравлика» (г. Уфа), АО «ЛТЗ» (г. Людиново), АО «МК Витязь» (г. Ишимбай), ОАО «ИВХИМПРОМ» (г. Иваново) при обработке резанием хромоникелевых, титановых сплавов, коррозионностойких сталей.

Методы исследования. Исследование влияния экспериментальных СОТС на эффективность лезвийной обработки металлов проводилось на основе фундаментальных положений теории резания металлов, а также методов экспериментального анализа и моделирования процессов, происходящих в контактной зоне при лезвийной обработке. Экспериментальные испытания по

изучению влияния активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при лезвийной обработке металлов проводились в лабораторных условиях с применением современной исследовательской аппаратуры и техники. Для обработки и описания полученных результатов использовались - теория планирования эксперимента и статистические методы исследования.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Термоактивационная схема процесса протекания радикально-цепных реакций при использовании в качестве компонентов СОТС кислородсодержащих полимерных присадок.

2. Результаты квантово-химического анализа процессов образования соединений металлов с кислородсодержащими полимерными присадками и расчет их термодинамических характеристик, объясняющие улучшения триботехнических параметров контактного взаимодействия в зоне резания.

3. Установленные зависимости влияния активированных коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками на характеристики процесса резания и периода стойкости режущего инструментального материала при обеспечении требуемых показателей качества обработанной поверхности.

4. По результатам экспериментальных исследований лезвийной обработки резанием с СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками установлена особенность влияния их активации на эффективность образования смазочно-разделительных пленок в контактной зоне «инструмент-деталь».

5. Предложены научные принципы выбора и использования эффекта активации разрядом «короны» смазочно-охлаждающих жидкостей с кислородсодержащими добавками.

Степень достоверности результатов работы подтверждаются их согласованностью с известными теоретическими и экспериментальными данными. Полученные результаты достигнуты путем применения современных измерительных инструментов, стандартных и не стандартных методик исследований процессов лезвийной обработки металлов и методов статистической обработки результатов.

Отдельные результаты диссертационной работы получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (проект № FSFS-2023-0003).

Апробация работы. Основные положения диссертации были обсуждены на: II и IV Международной научно-практической конференции «Техника и технологии трибологических исследований» (Иваново, 2009, 2015); Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии (XV Бенардосовские чтения)» (Иваново, 2009, 2011); на 3-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности 2014» (Москва, 2014); на VII-X Всероссийской научно-практической конференции «Надежность и долговечность машин и механизмов» (Иваново, 2016-2024); на Международной научно-практической заочной конференции «Инновационные

технологии в машиностроении» (Ульяновск 2018, 2020, 2024); на Международной конференции «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения», посвященная 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, 2023).

Соответствие паспорту специальности. п. 2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий. п. 6. Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы апробированы в производственных условиях, и значимые научные аспекты отражены в виде 64 публикаций, в том числе и в высокорейтинговых научных изданиях, в частности, более 21 статьи из перечня, рекомендованного ВАК, более двух статей в печатных изданиях из базы индексации «SCOPUS», остальные статьи и тезисы доклада в сборниках изданных работ международных, всероссийских и региональных научно – технических конференций, симпозиумов и семинаров.

Структура и объём работы. Диссертация содержит введение, четыре главы, список литературы и приложений. Объем диссертации 188 страниц машинописного текста, 24 таблицы, 76 рисунков, список литературы 110 наименований, 8 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности предлагаемой работы, сформулированы цель и задачи исследования, предложена методическая и теоретическая основа, обозначена научная новизна и практическая значимость.

В первой главе дается литературный обзор, отражающий результаты ранее проведенных исследований по повышению эффективности СОТС посредством введения в их состав различных присадок. Рассматриваются методы активации СОТС и их влияние на процессы механической обработки металлов резанием

Основы современных представлений о влиянии смазочно-охлаждающей среды на процессы трения, пластифицирования и диспергирования металлических тел при их механическом нагружении базируются на научных трудах П.А. Ребиндера, А.С. Ахматова, С.Я. Вейлера, Г.И. Епифанова, В.И. Лихтмана, Е.Д. Щукина, Ф.П. Боудена, Д.А. Тейбора и др. Их труды положили начало широкому использованию поверхностно-активных веществ в композициях смазочных материалов, в том числе смазочно-охлаждающих жидкостях для обработки металлов. Большой вклад в изучение механизма действия СОТС при резании металлов внесли работы М.И. Клушина, В.Н. Латышева, Л.В. Худобина, А.Г. Наумова, М.Б. Гордона, Т.Н. Лоладзе и других. Проведенные ими исследования позволили дать общую картину действий, которые осуществляет СОТС, поступая в зону резания.

Установлено, что интенсификация формирования химически активных компонентов в смазочной среде (атомов, ионов, свободных радикалов, ион-

радикалов) возможна с помощью внешних энергетических воздействий, что значительно повышает эффективность СОТС. Одним из таких методов является использование коронного разряда. Также перспективным направлением для улучшения трибологической обстановки в зоне резания является совершенствование СОТС с помощью введения функциональных присадок различной природы и химической структуры, в частности полимерных соединений. Исследования полимерных присадок при резании металлов проводили В.Н. Латышев, Г.В. Виноградов и В.В. Марков.

Полимерсодержащие среды, на операциях механической обработки, вступая в химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом, образуют химические связи, которые по энергии значительно превышают силы связей, имеющих место при физической адсорбции низкомолекулярных компонентов СОТС. С учетом этого, а также учитывая большое внимание в исследовательской практике к экологическим процессам металлообработки, исследование в качестве трибоактивных элементов к СОТС кислородсодержащих полимерных присадок с последующей активацией является актуальной задачей.

Во второй главе теоретически обоснован механизм действия активированных СОТС с полимерными присадками при резании металлов.

Как показывал акад. Н.Н. Семёнов, химические реакции на поверхности твердого тела (инструмента, обрабатываемого материала) осуществляется химически активными частицами (ионами, свободными атомами и радикалами), а не нейтральными молекулами. С учётом этого, на основе теории радикально-цепного механизма действия СОТС, предложенной проф. В.Н. Латышевым, разработана схема процесса активации протекания указанных реакций при использовании в качестве компонентов СОТС кислородсодержащих полимерных присадок (рис. 1).

Процесс образования разделительных смазочных плёнок на границе раздела инструмента с обрабатываемым материалом глубоко специфичен. Его интенсивность определяется состоянием трибосопряжённых металлических поверхностей, а также свойствами химически активных частиц (атомов, радикалов и т.д.), образующихся при разложении нейтральных молекул компонентов СОТС как под действием свежесформированных химически активных (ювенильных) поверхностей, так и при воздействии физических методов активации. Кроме того, интенсивность протекания физико-химических процессов в контактной зоне во многом определяется наличием и величиной экзоэлектронной эмиссии со свежесформированных металлических поверхностей (эффект Крамера). Чем интенсивнее эмиссия электронов и выше их энергия, тем вероятнее их взаимодействие с нейтральными молекулами СОТС, интенсивнее распад последних на атомы и радикалы.

С другой стороны, интенсификация химических реакций при резании металлов может быть достигнута предварительным воздействием на СОТС коронным разрядом (рис. 1). Такое воздействие может привести либо к распаду нейтральных компонентов СОТС с образованием химически активных частиц, либо к переводу нейтральных молекул СОТС в возбуждённое (метастабильное) состояние. Попадая в зону контакта, эти метастабильные молекулы, получая

дополнительную энергию от теплового излучения, экзоэлектронов, других возможных источников, распадаются с образованием химически активных частиц, участвующих в синтезе смазочных плёнок на трибосопряжённых поверхностях инструмента и обрабатываемого материала.

На основании данных литературных источников и физико-химических свойств полимеров, были выбраны следующие вещества в качестве присадок к СОТС - полиэтиленгликоль (ПЭГ) и поливиниловый спирт (ПВС), обладающие хорошей растворимостью в водных растворах.

Учитывая состав применяемых полимеров, можно предположить, что пленки, образующиеся на поверхности режущего инструмента, будут иметь металлополимерную природу. Для исследования возможности образования различных структур и механизмов протекания химических реакций с применением теоретических расчетных методов квантовой химии использовался полуэмпирический метод РМЗ.

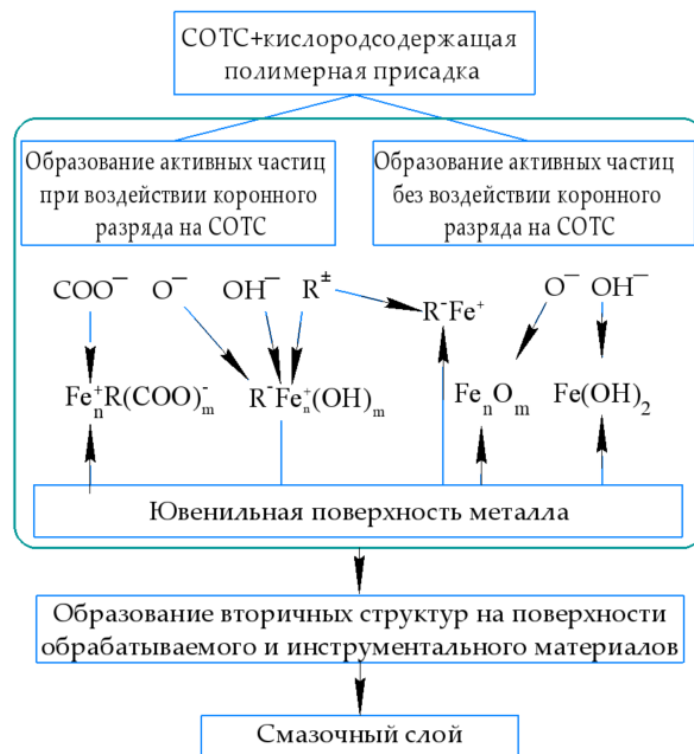


Рисунок 1 — Термоактивационная схема протекания радикально-цепных реакций при использовании кислородсодержащих полимерных присадок

Данный метод хорошо себя зарекомендовал для анализа структуры и свойств неорганических и органических соединений. Для проведения квантово-химических расчетов использовался элементарный фрагмент ПВС. Под действием коронного разряда и озона происходит отщепление атома водорода от атома углеродной цепи ПВС с образованием вторичных и третичных алкильных радикалов.

Благодаря наличию свободных 3d-орбиталей атом железа Fe способен принять неспаренный электрон от атома углерода углеродной цепи ПВС с образованием прочной ковалентной связи Fe-C. Затем к образовавшейся структуре возможно присоединение еще одного фрагмента ПВС (рис. 2, 3).

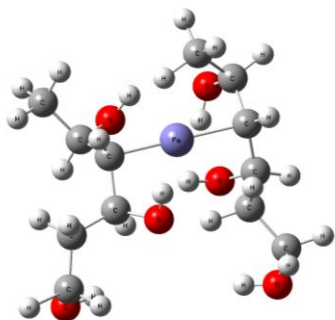


Рисунок 2 – Геометрическое строение комплекса состава: 1 (Fe):2 (вторичный радикал ПВС)

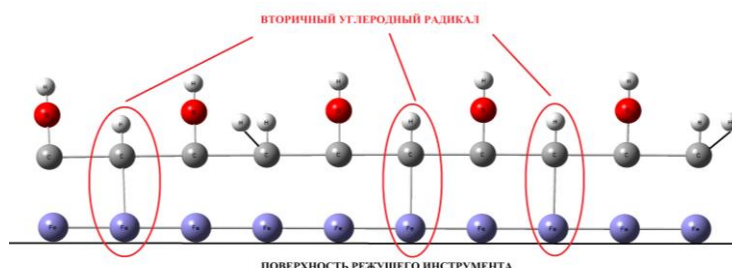


Рисунок 3 – Схема образования металлополимерных соединений в зоне резания при использовании активированного СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками

Таким образом, геометрическая оптимизация фрагмента структуры ПВС в рамках метода РМЗ показывает возможность существования комплексов с атомами железа.

В третьей главе представлены методики проведения экспериментальных исследований, оборудование и аппаратура, обрабатываемые и инструментальные материалы.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния активированного СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками на процесс обработки металлов резанием.

Для сравнения были взяты, выпускаемые ОАО «Ивхимпром» и широко используемые в промышленности СОТС «Эмульсол Т» и «Эфтол».

Были исследованы влияния полимерных присадок на поверхностные свойства жидкостей (табл. 1).

Наилучшие показания коэффициента поверхностного натяжения имеет СОТС «Эфтол» с присадками полимеров. Вместе с тем известно, что процесс смачивания жидкостью поверхностей заготовки и инструмента является необходимой предпосылкой для выполнения смазочного, моющего, охлаждающего, диспергирующего и демпфирующего действий СОТС. Результаты экспериментов позволяют говорить о предпочтении в данном случае применения «Эфтол» в качестве базового СОТС. Исследования по изучению периода стойкости режущего инструмента и показателей качества обработанной поверхности (шероховатости) также показали и подтвердили, что наиболее предпочтительной в качестве базового СОТС является «Эфтол».

Таблица 1 – Поверхностные свойства СОТС с новыми присадками

Наименование СОТС	Физико-химические свойства исследуемых СОТС				
	$\gamma, 10^{-3}$ Н/м	θ , град; (cos θ)	$W_s, 10^{-3}$ (Н/м)	$W_a, 10^{-3}$ (Н/м)	$W_k, 10^{-3}$ (Н/м)
Эмульсол Т	44,92	26; 0,899	40,37	85,21	89,84
Эмульсол Т+ПЭГ	43,21	20; 0,94	40,6	83,84	86,42
Эмульсол Т+ПВС	40,1	17; 0,956	38,29	78,31	80,1
Эфтол	41,31	28,6; 0,878	36,2	77,39	82,42
Эфтол+ПЭГ	38,97	23,4; 0,92	35,85	74,7	77,94
Эфтол+ПВС	34,85	19; 0,988	34,6	69,68	70,1

Проведенные эксперименты позволяют на данном этапе сделать предварительные выводы о положительном влиянии кислородсодержащих полимерных присадок, введенных в СОТС, на ключевые эксплуатационные параметры, такие как период стойкости режущего инструмента и шероховатость обработанной поверхности.

Для определения оптимальной концентрации растворенного полимера в базовом СОТС, а также знака и величину напряжения на коронирующем электроде, при которых происходят активационные процессы, исследовалось влияние на период стойкости режущего инструмента двух факторов: концентрация полимерных присадок в СОТС и величина напряжения на коронирующем электроде ионизатора-озонатора. Для проведения экспериментов применялась установка, представленная на рисунке 4.

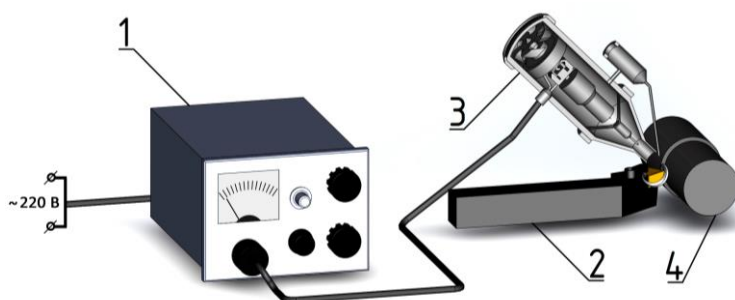


Рисунок 4 – Схема подачи ионизированного СОТС в зону резания при точении
1 – блок питания; 2 – режущий инструмент; 3 – ионизатор-озонатор;
4 – обрабатываемая заготовка

Обработка результатов экспериментальных данных проводилась с использованием математического планирования эксперимента на прикладной программе «Statistica». Выходной параметр (параметр оптимизации) - период стойкости инструмента. Была выбрана матрица планирования для двухфакторного эксперимента с трехуровневым варьированием факторов.

Для установления математической зависимости и выбора рациональных параметров применения изучаемого СОТС, был реализован полный факторный эксперимент 2^2 . Для всех полученных математических моделей были построены поверхности отклика, вид которых представлен на рис. 5, 6.

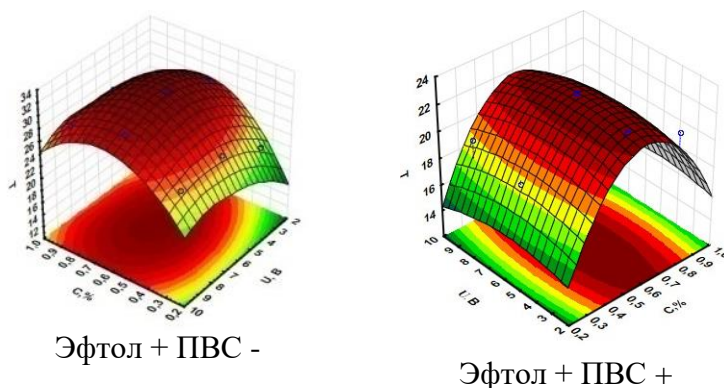
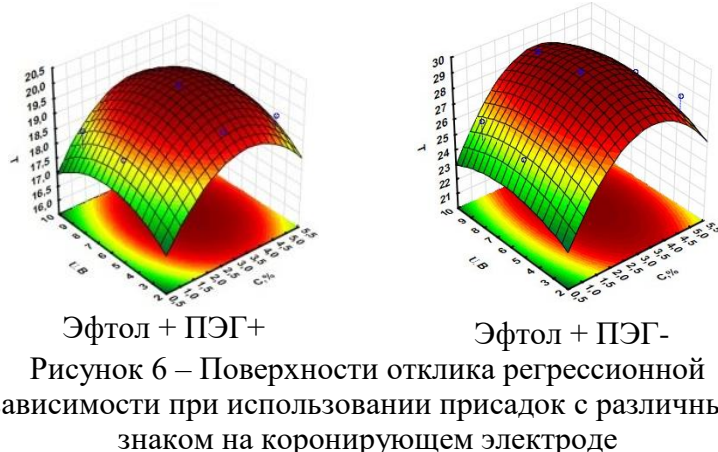


Рисунок 5 – Поверхности отклика регрессионной зависимости при использовании присадок с различным знаком на коронирующем электроде



В ходе исследований установлено, что наилучшие результаты наблюдались при напряжении на коронирующем электроде 6 кВ для отрицательного знака на коронирующем электроде и 5 кВ для положительного.

На основании экспериментальных исследований получены эмпирические зависимости периода стойкости режущих инструментов от скорости резания и подачи при использовании различных СОТС:

$$T = \frac{C}{V^n \cdot S^m} \quad (1)$$

где C , n , m – коэффициенты математической зависимости (табл. 2)

V – скорость резания (м/мин); T – время обработки (мин), S – подача (мм/об)

Таблица 2 – Значения коэффициентов зависимости (1) для различных СОТС

Исследуемая СОТС	Значения коэффициентов		
	C	n	m
Эфтол	2239,5	0,75	0,1
Эфтол +ПВС (-)	1972,4	0,5	0,05
Эфтол +ПВС (+)	703,4	0,4	0,1
Эфтол +ПЭГ (-)	2397	0,6	0,05
Эфтол +ПЭГ (+)	1422	0,5	0,05

Изучение периода стойкости режущего инструмента (ВК60М) при точении титанового сплава ВТ6 показало высокую эффективность применения активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками, что подтверждает полученные результаты (рис.7).

Максимальный период стойкости резцов наблюдался при использовании поливинилового спирта при отрицательной активации.

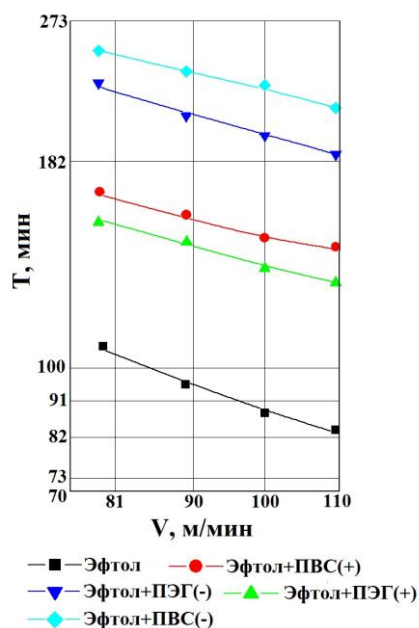


Рисунок 7 – Зависимость периода стойкости от скорости резания при точении ВТ6 – ВК6ОМ

При этом, как показал анализ результатов, период стойкости резцов повышается в 2 раза по сравнению с СОТС без полимерных присадок и активации коронным разрядом. Применение вышеизложенных СОТС при сверлении инструментом из стали Р6М5К5 позволяет повысить период стойкости инструмента в 2,5 раза при использовании в качестве присадки к СОТС поливинилового спирта, активированного отрицательным разрядом, и в 2 раза при использовании присадки полиэтиленгликоля, также активированного отрицательно по сравнению с резанием без применения СОТС. Таким образом, проведёнными исследованиями установлено, что совокупное действие кислородсодержащих полимерных присадок, растворенных в СОТС, и последующая его активация коронным разрядом оказывает положительное воздействие на период

стойкости инструментов, изготовленных из различных инструментальных материалов.

В результате проведенных экспериментов по влиянию активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками на величину крутящего момента при сверлении установлено, что данные СОТС способствуют уменьшению крутящего момента (рис. 8).

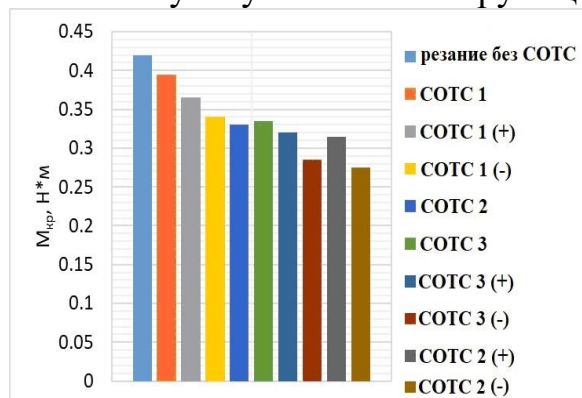


Рисунок 8 – Диаграмма крутящего момента при сверлении ВТ5-1-Р6М5К5 с использованием различных СОТС ($V = 26$ м/мин, $t = 3,35$ мм, $S = 0,1$ мм/об)

Применение полимерсодержащего СОТС уменьшает величину крутящих моментов за счет снижения трения, а также работы, затрачиваемой на деформацию снятия стружки. Кроме воздействия на абсолютную величину $M_{кр}$, эффективные СОТС способствуют его стабилизации за счет уменьшения адгезии обрабатываемого материала. Изучение влияния исследуемых СОТС на шероховатость обработанных поверхностей показали, что в присутствии этих среды среднее значение высоты микронеровностей снижается по сравнению с применением

базового СОТС. Так, при резании нержавеющей стали 12Х18Н10Т высота микронеровностей снижается на 20 – 40%, титанового сплава ВТ5-1 - на 20 – 30 % во всём диапазоне применённых скоростей резания, стали 45 до 40 % по сравнению с применением базового СОТС.

Величина деформированного слоя обработанной поверхности является одной из характеристик трибологического состояния контактной зоны в процессе резания. Этот параметр определялся по распределению микротвёрдости от поверхности вглубь материала. Установлено, что максимальное значение микротвёрдости во всех экспериментах наблюдалось на поверхности образцов. При использовании СОТС уменьшается не только поверхностное значение микротвёрдости, но и глубина деформированного слоя.

При резании нержавеющей стали 12Х18Н10Т глубина деформированного слоя при обработке без СОТС составила 43–45 мкм (рис. 9). Применение активированных полимерсодержащих СОТС, способствовало уменьшению микротвёрдости и глубины деформированного слоя. Подобные результаты получены и при резании сплава ВТ5-1. Величина зоны деформации при обработке без применения СОТС составила 48-50 мкм (рис. 10), при использовании активированных полимерсодержащих СОТС - уменьшалась до 15 мкм. Аналогичный положительный эффект наблюдался при обработке среднеуглеродистых сталей, в частности стали 45.

Исходя из представленных данных следует, что активированные СОТС с кислородсодержащими присадками более благоприятно влияют на процесс стружкообразования.

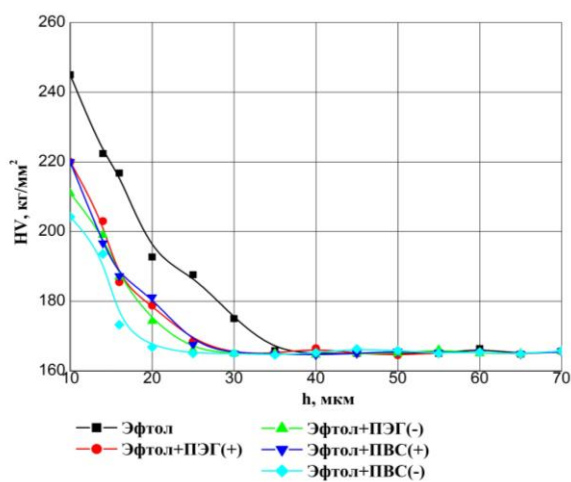


Рисунок 9 – Зависимость микротвёрдости 12Х18Н10Т от глубины деформированного слоя (при точении $V = 18$ м/мин., $S = 0,1$ мм/об)

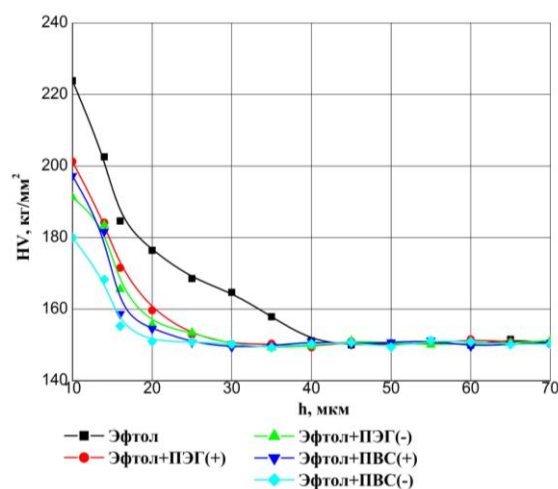


Рисунок 10 – Зависимость микротвёрдости ВТ5-1 от глубины деформированного слоя (при точении $V = 21$ м/мин., $S = 0,1$ мм/об)

Представленные данные хорошо коррелируют с результатами по изучению величины остаточных напряжений на обработанной поверхности (рис. 11).

Выбор стали 45 в качестве обрабатываемого материала обусловлен широким распространением данного металла, отсутствием легирующих элементов, что в целом, позволяет наиболее ярко наблюдать и описывать явления и процессы, происходящие в зоне резания при использовании различных СОТС, чем в других металлах.

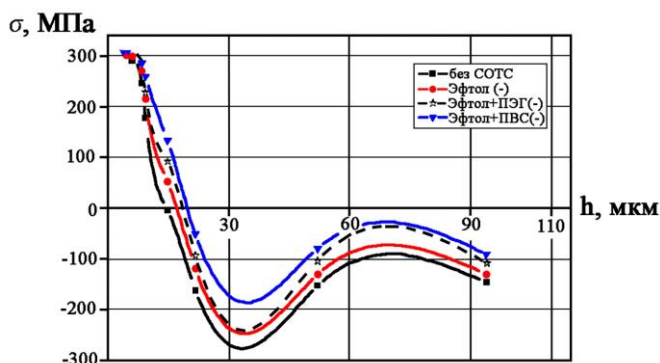


Рисунок 11 – Остаточные напряжения при точении стали 45
 $V = 45$ м/мин, $S = 0,1$ мм/об., $t = 0,5$ мм

Анализ изучения корней стружек показал, что применение в качестве активированных СОТС, имеющих в своем составе кислородсодержащие полимерные присадки, оказывает благоприятное влияние на условия стружкообразования, в частности, на условный угол сдвига (табл. 3) и снижение нароста.

Таблица 3 – Значения условного угла сдвига при точении стали 45

Применяемая СОТС	без СОТС	Эфтол	Эфтол(+)	Эфтол(-)	Эфтол+ПВС	Эфтол+ПЭГ	Эфтол+ПЭГ(+)	Эфтол+ПВС(+)	Эфтол+ПЭГ(-)	Эфтол+ПВС(-)
Условный угол сдвига β , град	11	14	17	17	17	16	19	18	24	28

Представленные данные, при прочих одинаковых условиях проведения экспериментов, свидетельствуют об облегчении процесса стружкообразования в результате улучшения трибологической обстановки в контактной зоне и, как следствие, приводит к увеличению срока службы инструментов в результате использования в качестве СОТС активированных технологических сред, имеющих в своём составе кислородсодержащие полимерные присадки.

Возможность образования химически активных частиц изучалась методом синхронного термического анализа (рис. 12).

В ходе исследований установлено, что по сравнению с ПЭГ ПВС проявляет большую термическую стабильность, т.е. является более устойчивым к нагреванию в атмосферных условиях. Карбоновые кислоты, выделяющиеся в процессе термодеструкции, могут взаимодействовать с обрабатываемым металлом с образованием солей (например, ацетата железа II), облегчая процесс резания материалов.

При использовании коронного разряда дополнительно образуются атомы, ионы, радикалы кислорода, которые способны активно взаимодействовать как с компонентами СОТС, так и с инструментальным и обрабатываемым материалами с образованием оксидных плёнок, основная функция которых заключается экранировании адгезионных взаимодействий между трибосопряжёнными металлами при их взаимном перемещении.

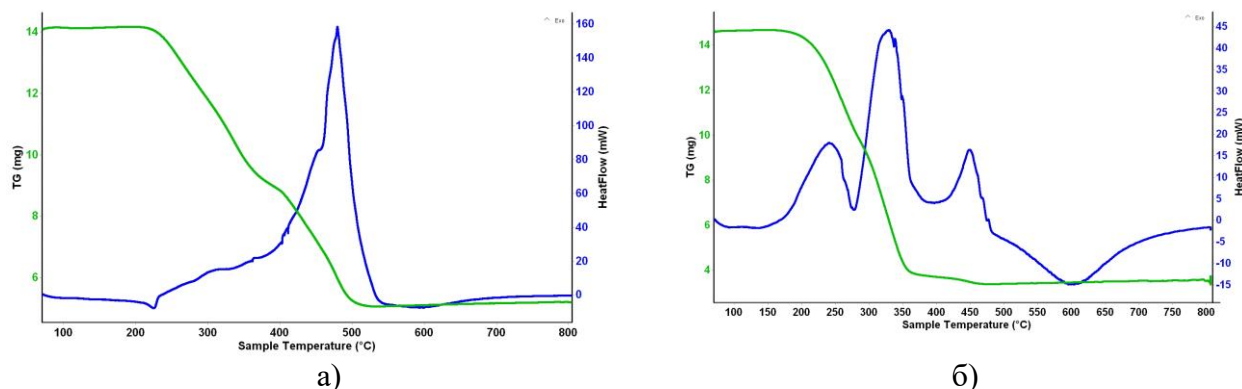


Рисунок 12 – Результаты термической деструкции в азотно-кислородной среде
а) ПВХ, б) ПЭГ

Наличие в исследуемой системе металла не приводит к изменению общего хода кривой (рис. 13). Отмечено, что в присутствии металла наблюдается «сдвиг» окончания процесса термического разложения полимерных присадок в сторону более высоких температур на примерно одинаковую величину (ПВС – на 80 °С, ПЭГ – на 70 °С), а потеря массы образцов, при этом, уменьшается.

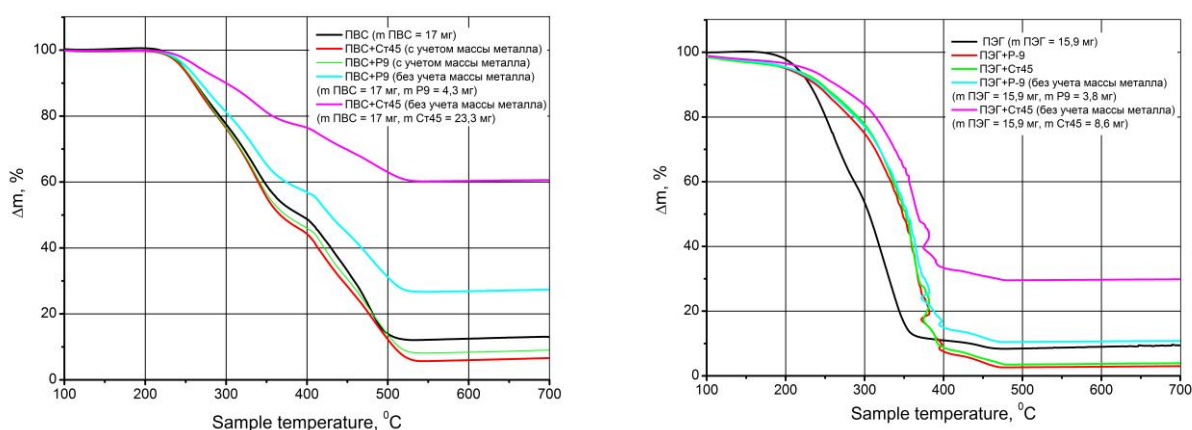


Рисунок 13 – Термограммы совместного нагрева металлов с компонентами СОТС

Наблюдаемое явление можно объяснить образованием, наряду с оксидами, металлополимерных соединений. Это подтверждается результатами проведённых исследований по изучению вторичных структурных образований на прирезцовой стороне стружки, в результате которых были зафиксированы вещества. Их идентификация не проводилась в виду отсутствия сравнительных баз данных. Применительно к реальным процессам резания металлополимерные соединения, согласно данным исследователей, способны улучшать трибологическую обстановку контактной зоны.

Из анализа представленных данных следует, что предлагаемые присадки могут найти свое применение при работе в различных температурных интервалах: ПЭГ наиболее подходит для области низких и средних температур, а ПВХ – в области средних и высоких температур в зоне резания.

Проведен расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения активированного полимерсодержащего СОТС. Расчет проводился путем сопоставления затрат по базовому СОТС (Эфтол) и СОТС (Эфтол) с полимерной присадкой ПВХ (поливиниловый спирт) и составил 283750 рублей.

Основные результаты и выводы

По результатам теоретико-экспериментальных исследований и производственной апробации подтверждена эффективность повышения лезвийной обработки резанием путем применения, активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками.

1. На основании термодинамических исследований полимерсодержащих активированных СОТС обоснованы и изучены механизмы влияния предлагаемых СОТС на эффективность лезвийной обработки за счет образования металлополимерных комплексов в контактной зоне.

2. Установлено, что применение активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками позволяет повысить период стойкости инструментов в 2 раза при точении труднообрабатываемых сплавов и конструкционных сталей, а также позволяет повысить стойкость осевого режущего инструмента в 2,5 раза при использовании активированных СОТС с присадкой поливинилового спирта, и в 2 раза при использовании присадки полиэтиленгликоля.

3. Определено, что применение активированных полимерсодержащих СОТС позволяет уменьшить шероховатость обработанных поверхностей при точении титанового сплава BT5-1 на 30 %, коррозионностойкой стали 12X18H10T и стали 45 на 40 %.

4. По результатам изучения кислородсодержащих присадок методом синхронного термического анализа установлено, что данные присадки эффективны при работе в различных температурных интервалах: ПЭГ – области низких и средних температур, ПВС – области средних и высоких температур в зоне резания.

5. Разработаны регрессионные математические модели зависимости периода стойкости режущего инструмента от элементов режима резания при точении и сверлении, позволяющие прогнозировать эффективность применения, активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при лезвийной обработке других обрабатываемых материалов.

6. Определены и предложены оптимальные составы СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками и их рациональные режимы использования. Для присадки ПВС оптимальная концентрация в СОТС составляет 0,6 %, напряжение на коронирующем электроде при отрицательном знаке 6 кВ, при положительном знаке – 5 кВ. Для присадки ПЭГ оптимальная концентрация в СОТС составляет 3,5 %, напряжение на коронирующем электроде при отрицательном знаке составляет 6 кВ, при положительном знаке – 5 кВ.

7. Разработаны принципы выбора и применения, активированного коронным разрядом СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками, позволяющие повысить эффективность лезвийной обработки точением и сверлением сталей и сплавов.

8. Результаты работы апробированы и внедрены при лезвийной обработке резанием хромоникелевых, титановых сплавов, коррозионно-стойких сталей на промышленных предприятиях АО УАП «Гидравлика» (г. Уфа), АО «ЛТЗ»

(г. Людиново), АО «МК Витязь» (г. Ишимбай), ОАО «ИВХИМПРОМ» (г. Иваново).

9. На основании расчета технико-экономических показателей установлено, что эффективность применения активированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС составляет 283750 рублей в год.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в журналах, входящих в перечень ВАК России

1. **Репин, Д.С.** Влияние активированных полимерсодержащих СОТС при обработке металлов резанием / **Д.С. Репин**, В.Н. Латышев, А.Г. Наумов // *Металлообработка*. – 2011. – № 4(65). – С. 2–4.

2. Наумов, А.Г. Влияние активированных полимерсодержащих СОТС на характеристики процессов лезвийного резания металлов / А.Г. Наумов, **Д.С. Репин**, В.Н. Латышев, В.С. Раднюк // *Металлообработка*. – 2018. – № 1(103). – С. 2–5.

3. **Репин, Д.С.** Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием / **Д.С. Репин**, А.Г. Наумов // *Вестник УГАТУ*. – 2020. – Т. 24. – № 2(88). – С. 36–42.

4. **Репин, Д.С.** О некоторых аспектах применения активированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС при обработке металлов резанием / **Д.С. Репин**, А.Г. Наумов, В.Б. Бубнов, Е.В. Зарубина // *Металлообработка*. – 2022. – №1(127). – С. 3–10.

5. Мигранов, М.Ш. Исследование контактных процессов при точении инструментом с наноконпозиционными покрытиями / М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов, **Д.С. Репин** // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2023. – № 4. – С. 161–165.

6. Мигранов, М.Ш. Износостойкость режущего инструмента с инновационными многослойными покрытиями при применении активированных полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств / М.Ш. Мигранов, А.Г. Наумов, **Д.С. Репин**, А.С. Гусев // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2023. – № 6. – С. 271–275.

7. Мигранов, М.Ш. Эффективность наноструктурированных износостойких покрытий при высокоскоростном точении титановых сплавов / М.Ш. Мигранов, А.С. Гусев, А.М. Мигранов, **Д.С. Репин**, Н.В. Колосова // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2023. – Т. 19, № 8(224). – С. 370–377.

8. Мигранов, М.Ш. О механизме действия кислородсодержащих полимерных присадок, активированных коронным разрядом, при резании металлов / М.Ш. Мигранов, **Д.С. Репин**, С.А. Сырбу, А.Г. Наумов, С.А. Шабунин // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2023. – № 8. – С. 381–384.

9. Мигранов, М.Ш. Активация кислородсодержащих полимерных присадок и покрытий при резании металлов / М.Ш. Мигранов, А.С. Гусев, Н.В. Колосова, А.М. Мигранов, **Д.С. Репин**, А.Г. Наумов // *Вестник Тверского*

государственного технического университета. Серия «Технические науки». – 2023. – № 4(20). – С. 5–13.

10. Мигранов, М.Ш. Триботехнические испытания высокоэнтропийных износостойких покрытий / М.Ш. Мигранов, А.С. Гусев, С.С. Оплеснин, Д.С. Репин, Р.Р. Харунов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – № 7. – С. 321–326.

11. Мигранов, М.Ш. Повышение эффективности обработки деталей силовой части газотурбинных двигателей / М.Ш. Мигранов, А.С. Гусев, К.А. Гарифуллин, С.С. Оплеснин, Д.С. Репин, Ю.А. Тюрина // Вестник Московского авиационного института. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 183–192.

12. Мигранов, М.Ш. Износостойкость наноструктурированных многослойных покрытий на режущем инструменте после лазерной обработки / М.Ш. Мигранов, К.А. Гарифуллин, А.С. Гусев, А.Ю. Колосов, С.С. Оплеснин, Д.С. Репин, Ю.А. Тюрина // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2024. – Т. 20, № 9(224). – С. 428–432.

Публикации в журналах, цитируемых SCOPUS и Web of Science

13. Latyshev, V.N. Experimental Studies of Tribological Phenomena during Material Cutting / V.N. Latyshev, A.G. Naumov, V.S. Radnyuk, D.S. Repin, K.V. Kurapov, S.A. Zhukovsky, O.V. Tkachuk // *Trenie i Iznos*. – 2010. – Vol. 31, No. 5. – P. 500–510.

14. Migranov, M.S. Study of Tribotechnical Properties of Multilayer Nanostructured Coatings and Contact Processes during Milling of Titanium Alloys / M.S. Migranov, S.R. Shehtman, N.A. Sukhova, A.P. Mitrofanov, A.S. Gusev, A.M. Migranov, D.S. Repin // *Coatings*. – 2023. – Vol. 13, No. 1. – P. 171.

15. Metel, A.S. High-Speed Milling of Heat-Resistant Alloys with Tools with High-Entropy Wear-Resistant Coatings / A.S. Metel, A.M. Migranov, K.A. Garifullin, A.P. Malahinskiy, D.S. Repin // *Proceedings of the 10th International Conference on Industrial Engineering, Sochi, Russian Federation, 19–24 мая 2024 года*. – Sochi, Russian Federation: SPRINGER, 2024. – P. 743-753. – DOI 10.1007/978-3-031-65870-9_69.