

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»

**На правах рукописи**



**РЕПИН ДЕНИС СЕРГЕЕВИЧ**

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

2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Диссертация на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Мигранов Марс Шарифуллович

Москва – 2025

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ СОТС ДЛЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ.....	15
1.1 Физико-химические явления, протекающие в контактной зоне при резании металлов с использованием СОТС .....	15
1.2 Влияние свободных радикалов на эффективность обработки металлов резанием .....	25
1.3 Анализ методов активации СОТС.....	28
1.4 Использование коронного разряда в процессе лезвийной обработки металлов .....	30
1.5 Ионизация СОТС при механической обработке металлов резанием .....	32
1.6 Применение присадок высокомолекулярных соединений для повышения эффективности СОТС .....	33
Выводы по главе 1.....	38
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО- ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ СОТС С ПОЛИМЕРНЫМИ ПРИСАДКАМИ.....	39
2.1 Механизм смазочного действия СОТС с кислородсодержащими присадками.....	39
2.2 Применение различных моделей в области обработки металлов резанием при определении изнашивания режущего инструмента.....	43
2.3 Общий энергетический анализ процессов трения при резании .....	51
2.4 Моделирование процессов образования соединений металлов с кислородсодержащими полимерными присадками .....	57
Выводы по главе 2.....	64
ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА. ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	66

3.1 Используемые материалы и методы исследования.....	66
3.2 Методы металлографического и металлофизического анализов.....	67
3.3 Метод измерения поверхностного натяжения и краевого угла .....	69
3.4 Метод контактного измерения шероховатости обработанной поверхности .....	72
3.5 Метод определения остаточных напряжений в заготовках после лезвийной обработки .....	73
3.6 Прибор для энергетического воздействия на исследуемое СОТС .....	75
3.7 Установки для износостойкостных испытаний СОТС при лезвийной обработке металлов.....	76
3.8 Метод изучения вторичных структур с помощью электронной микроскопии .....	80
3.9 Планирование экспериментов и математическая обработка результатов опытов .....	81
3.9.1 Обработка результатов эксперимента и нахождение оптимальных параметров эффективного применения СОТС .....	81
3.9.2 Исследование влияние основных факторов процесса резания на период стойкости режущего инструмента .....	86
3.10 Синхронный термический анализ .....	87
Выводы по главе 3.....	89
<b>ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СОТС АКТИВИРОВАННОГО КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ НА ЛЕЗВИЙНУЮ ОБРАБОТКУ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ.....</b>	<b>90</b>
4.1 Экспериментальное исследование поверхностной активности кислородсодержащих полимерных присадок при выборе базового СОТС..	90
4.2 Проведение экспериментальных исследований по выбору базового состава СОТС для кислородсодержащих полимерных присадок.....	93
4.3 Установление зависимости рациональных параметров применения активированного полимерсодержащего СОТС при точении .....	102

4.4 Экспериментальное исследование активированных полимерсодержащих СОТС при лезвийной обработке металлов.....	106
4.4.1 Влияние СОТС с присадками полимеров, активированного коронным разрядом, на износостойкость режущего инструмента при точении .....	106
4.4.2 Исследование влияние основных факторов процесса резания на период стойкости режущего инструмента .....	108
4.4.3 Исследование шероховатости поверхности при точении с использованием СОТС, содержащего полимерные присадки, активированного коронным разрядом .....	114
4.5 Исследование СОТС с полимерными присадками, активированного коронным разрядом при сверлении .....	116
4.5.1 Исследование влияния состава СОТС, активированного коронным разрядом, на крутящий момент при сверлении .....	117
4.5.2 Воздействие СОТС с полимерными присадками, активированного коронным разрядом, на период стойкости режущего инструмента при сверлении .....	121
4.6 Исследование зоны вторичных деформаций и определение микротвердости металлов после обработки резанием с использованием СОТС с полимерными присадками.....	125
4.7 Изучение остаточных напряжений в поверхностном слое.....	132
4.8 Исследование вторичных структур методом электронографии .....	136
4.9 Исследование термической стабильности кислородсодержащих полимерных присадок.....	141
4.10 Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения активированного полимерсодержащего СОТС .....	147
Выводы по главе 4.....	149
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ .....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А Акты внедрения .....	165

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Химический состав инструментальных и обрабатываемых материалов .....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ В Матрица планирования и результаты экспериментов по определению концентрации присадки и напряжения на коронирующем электроде при точении.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Результаты экспериментального исследования влияния варьируемых факторов на период стойкости режущего инструмента на операции точения .....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Результаты экспериментов по определению шероховатости при точении 12Х18Н10Т.....	178
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Результаты экспериментов по определению шероховатости при точении ВТ5-1.....	179
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Результаты экспериментального исследования влияния варьируемых факторов на период стойкости режущего инструмента на операции сверления.....	180
ПРИЛОЖЕНИЕ И Результаты исследования термической деструкции полимерных присадок.....	184

**Список сокращений и условных обозначений**

ПВС	- поливиниловый спирт
ПЭГ	- полиэтиленгликоль
$\beta$	- угол сдвига
HV	- твердость поверхности заготовки по Виккерсу, кг/мм <sup>2</sup>
$\sigma$	- механическое напряжение, Па
СОТС 1	- Эфтол
СОТС 2	- Эфтол+ПВС
СОТС 3	- Эфтол+ПЭГ
СОТС 4	- Эмульсол Т
СОТС 5	- Эмульсол Т +ПВС
СОТС 6	- Эмульсол Т +ПЭГ
(+)	положительный знак на коронирующем электроде
(-)	отрицательный знак на коронирующем электроде

## ВВЕДЕНИЕ

**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).

Анализ опыта применения СОТС в большинстве передовых предприятий машиностроительной отрасли позволил установить, что при их рациональном использовании возможно обеспечить: увеличение периода стойкости инструмента, в среднем от 1,5 до 4 раз; повышение режима резания на 30 –55 %; увеличение эффективности (производительности) обработки от 20 до 55 % с обеспечением высоких показателей по качеству обработанных поверхностей детали и значительном снижении энергозатрат и сокращении других ресурсов на механическую обработку резанием. При этом не мало важное значение имеет повышение эффективности обработки титановых и хромоникелевых сплавов, а также труднообрабатываемых сталей и сплавов с повышенной жаропрочностью, жаростойкостью и коррозионностойкостью обрабатываемых на современных высокопроизводительных станках, оснащённых дорогостоящими системами автоматизированного (АСУ) и адаптивного управления (АдСУ), а также высокопроизводительными мехатронными модулями. Использование современных инновационных СОТС обеспечивает улучшение санитарно-гигиенических условий труда и требуемого микроклимата в рабочей зоне механообрабатывающего участка.

Машиностроительная промышленность для лезвийной обработки резанием использует больше 80 разновидностей смазочно-охлаждающих технологических средств с массовым и специальным функционалом применения, соответствующие

мировым стандартам по качеству, и являются основой необходимого ассортимента списка. При обилии современных высокоэффективных СОТС, по-прежнему остро стоит вопрос их рационального выбора, разработки и внедрения в производственный процесс на основе глубокого анализа физико – химических явлений в зоне резания при высоких температурно – силовых нагрузках и специфических контактных явлениях пары «режущий инструмент – обрабатываемая деталь» в условиях лезвийной обработки металлов резанием; рассмотрения природы и тщательного анализа механизмов влияния СОТС на износостойкость инструмента, показатели качества обработанной поверхности и, в целом, эффективность их применения. Вместе с тем следует отметить, что при выборе и оценки эффективной марки СОТС, в большинстве случаев, основной акцент делается на результаты экспериментальных исследований влияния смазочного материала на физико - механические и технологические параметры процесса обработки без учета особенностей контактных процессов и возможности применения различных дополнительных активационных воздействий на смазочно – охлаждающую среду.

В современном машиностроительном производстве, в условиях 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 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.

Работами [25, 26, 35, 47, 50, 54, 68, 84] установлено, что эффективность существующих смазочных материалов можно повысить, используя в качестве иницилирующих элементов полимерные присадки.

В тоже время, применение известных физических методов активации СОТС, в том числе, содержащих полимерные присадки, может оказывать синергетических эффект на процесс механической обработки металлов резанием, что проявляется в повышении износостойкости режущего инструмента, улучшение качества обработанной поверхности и т.д.

**Степень разработанности.** Изучению физико-химических взаимодействий между инструментом и обрабатываемым материалам при наличии внешней среды посвящены работы: 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. Полученные 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 нестандартных 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.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ СОТС ДЛЯ ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗАНИЕМ

## 1.1 Физико-химические явления, протекающие в контактной зоне при резании металлов с использованием СОТС

При резании инструмент снимает стружку с обрабатываемого материала, а стружка и деталь, в свою очередь, уносят частицы износа режущего инструмента. Объем изношенного материала невелик. Однако со временем форма режущей кромки инструмента изменяется так, что он перестает резать. Износ режущего инструмента происходит по передней и задней поверхностям. Согласно [92], износ является сложным процессом. Существует несколько его видов, которые проявляются самостоятельно или в сочетании друг с другом, в зависимости от условий резания. Основными видами износа режущего инструмента являются – абразивный (истирание трущихся поверхностей, подобное шлифованию); адгезионный (образование и разрушение металлических связей двух трущихся поверхностей, в результате чего прилипшие или приварившиеся к обрабатываемому материалу частицы инструментального материала уносятся в шлам); диффузионный (сложный процесс переноса атомов одного металла к другому через поверхность касания двух трущихся пар). Экспериментально доказано существование других видов износа:

- химического – образование под воздействием СОТС на поверхности режущей части инструмента легко удаляемых химических соединений;
- термоэлектрического – перенос частиц инструментального и обрабатываемого материалов термоэлектрическими токами.

Снижение работоспособности инструмента может также происходить в результате усталостного разрушения (образование трещин и сколов), скругления режущих кромок и пластической деформации режущего клина. Причем, все

вышеуказанные виды износа и явления присущи и для обычных трибосопряжений.

После срезания инструментом стружки на металлической поверхности образуется ювенильная поверхность, обладающая необычными свойствами.

Идеально чистая ювенильная поверхность проявляет высокую реакционную способность, интенсивно излучает поток электронов и характеризуется высокими коэффициентами трения, что создаёт оптимальные условия для протекания адгезионных и диффузионных процессов в контактных зонах «режущий инструмент — обрабатываемое изделие».

Кроме того, ювенильные поверхности, которые образуются при резании, выступают в роли катализаторов химических реакций. В частности, происходит значительное снижение температуры термического разложения молекул СОТС, а также образуются продукты циклизации и полимеризации при разложении технологических средств на поверхностях металла. Свежеобразованные поверхности при резании металлов интенсивно оказывают влияние на элементы СОТС, такие как, кислород, йод, хлор с образованием на ней химических пленок, которые не только уменьшают силы трения, но и снижают адгезионные и диффузионные процессы износа режущего инструмента. Уже небольшие количества смазочно-охлаждающих жидкостей, попадающие в зону резания, оказывает заметное влияние на эффективность процесса резания металлов. Поэтому огромное внимание уделяется вопросам изучения проникновения СОТС на площади контактного взаимодействия.

Основными схемами (путями) проникновения среды в контактные зоны являются, по - видимому, капилляры и поры, возникающие в местах контакта инструмента с обрабатываемым материалом и стружкой (рис. 1.1, *а*) и полости, образующиеся периодическим срывом нароста (рис. 1.1, *б*). Проникновению СОТС в зону резания способствуют высокочастотные вибрации и ультразвуковые колебания (рис. 1.1, *в*). Дж. Вильмсом была предложена аналитическая модель - капиллярный механизм проникновения смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания через срезаемый слой металла на переднюю поверхность режущего клина

инструмента.

Т. Смит [109] предложил теоретическую модель взаимодействия смазочно-охлаждающих жидкостей при механической обработке, основанную на теории капиллярного течения. Данная модель утверждает, что трещины в стружке и вдоль границы раздела инструмент-стружка позволяют быстро транспортировать смазочно-охлаждающую жидкость или пары в стружку и вдоль границы раздела инструмент-стружка. Это облегчает как образование стружки, так и ее скольжение по режущей поверхности инструмента, тем самым, снижая энергию, необходимую для процесса резания.

В.Н. Латышевым [47] экспериментально установлено, что лезвийная обработка при низких и средних скоростях резания характеризуется наличием дискретного характера контактных процессов стружки о переднюю поверхность режущего клина, что способствует формированию микрометрических капилляров, обеспечивающих непрерывную подачу на поверхности зоны резания компонентов (молекулы и ее пары) смазочно – охлаждающей жидкости. При этом, непрерывность обеспечения питанием смазочной средой трибозоны резания достигается высокой скоростью подводимой жидкости от 3,5 до 4,0 м/с.

Способность проникновения СОЖ на различные глубины зависят от следующих факторов: размера поверхностных капиллярных каналов на границе режущего клина и стружки; вибрационных и акустических эффектов; на межфазной границе от энергии поверхностного натяжения; физико – механических и химико – термических свойств смазочно – охлаждающей жидкости и др. При форсированных режимах резания, когда контакт стружки с инструментом является более сплошным, размеры капилляров многократно уменьшаются, и трущиеся поверхности сильно пластифицированы, проникновение СОЖ в контактные зоны возможно лишь в газообразном состоянии. В этом случае смазывание трущихся поверхностей осуществляется продуктами термического разложения СОЖ, которые вступают во взаимодействие с трущимися поверхностями или с кислородом воздуха, а затем с металлической поверхностью. Проникновение ионов, атомов или молекул

смазочно-охлаждающей жидкости в контактные зоны возможно и через деформированный слой стружки или по плоскостям сдвига в стружке (рис. 1.1, з). Исследованиями Дж. Хорна и С.Я. Вейлера установлено, что СОТС проникает преимущественно с боковых сторон стружки.

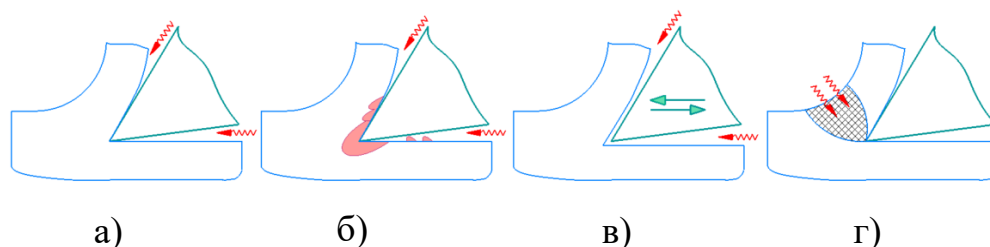


Рисунок 1.1 – Схемы поступления СОТС в зону резания

Известно, что основными силами, обеспечивающие проникновение СОТС в контактную зону режущего клина с обрабатываемым материалом связаны с химическим взаимодействием, адсорбционными явлениями, вибрационными колебаниями, воздействием электрических и магнитных полей [84]. Доступ смазочного материала в зону резания происходит также вследствие колебаний режущего инструмента и заготовки, т.е зависит от жесткости системы «станок – приспособление – инструмент – заготовка» (СПИЗ). Среди наиболее важных факторов, обуславливающих эффективность проникающего действия СОТС, можно выделить способ подачи смазочного материала в зону резания (полив, подача под давлением или в распыленном виде), вязкость, поверхностные свойства, химическую природу и размеры молекул, атомов и ионов СОТС.

По результатам многочисленных исследований СОТС установлено, что при лезвийной обработки резанием проявляются как комплексные, так и отдельные их функции, в частности, смазывающая, охлаждающая, диспергирующая, моющая, транспортирующая, которые оказывают существенное влияние на контактные процессы и в целом определяют эффективность их применения. Согласно исследованиям Г.И. Елифанова, механизм и зоны действия СОТС (рис. 1.2) выглядит следующим образом - охрупчивание срезаемого слоя характерно для зоны I и II, которое обусловлено упруго - пластическим деформированием обрабатываемого материала в зоне условной плоскости сдвига; смазывание

обеспечивается образованием особых защитных пленок на контактных площадках по передней поверхности III и по задней поверхности IV режущего клина.

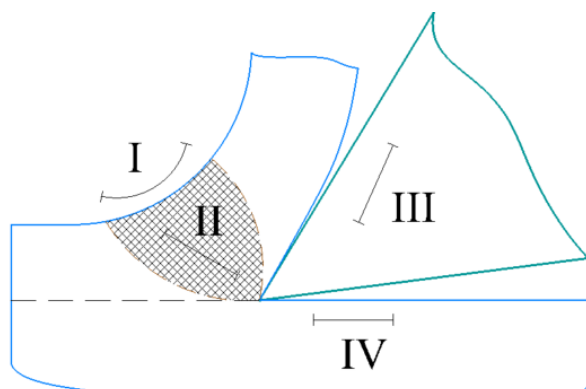


Рисунок 1.2 – Зоны действия СОТС при резании

П.А Ребиндер в своей работе показал, что поверхностно-активные вещества, используемые при механической обработке металлов, оказывают существенное влияние на процессы пластической деформации [40].

Работами иностранных ученых [101, 102, 105, 106] при проведении экспериментов были получены результаты, показывающие, что смазывающий эффект зависит от физико-химических процессов в контактной зоне, что является результатом образования смазочных пленок на поверхностях трибосопряжения.

Таким образом, механизм смазочного эффекта при резании заключается в формировании вторичных структур на границах указанных поверхностей, которые в различной степени уменьшают непосредственное взаимодействие металлов во фрикционной паре [50].

Н.Н. Зорев пришел к выводу, что СОТС влияет на показатели резания исключительно за счет уменьшения коэффициентов трения стружки с передней частью резца. В случае повышения удельных давлений на инструмент, происходит распад смазочного слоя, что способствует уменьшению влияния смазочной жидкости на показатели трения [40, 81].

Результаты исследований [41, 63] показывают, что внешняя среда играет роль в снижении адгезии и обеспечении однородного режима граничного трения. Оптимальна та жидкость, которая выполняет это условие благодаря активному

взаимодействию с обрабатываемым материалом и образующимися в контактных зонах вторичными структурами (рис. 1.3).

Применение смазочно-охлаждающих технологических средств при резании труднообрабатываемых материалов (титановые сплавы, коррозионностойкие, жаропрочные, жаростойкие и высокопрочные стали) вызывает все больший интерес из-за сложных трибологических условий в контактной зоне. СОТС применяются в процессе обработки для уменьшения износа инструмента, трения, и тепловыделения, повышение периода стойкости режущего инструмента и т.д.

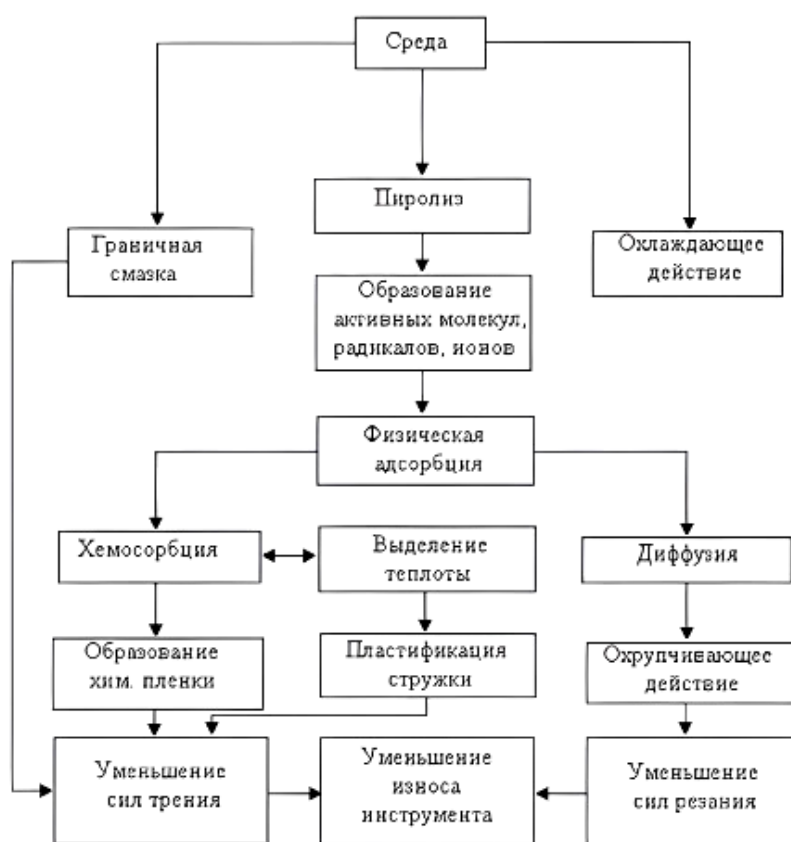


Рисунок 1.3 – Воздействие смазочной среды на трибологические процессы в зоне резания

Так анализ литературных источников, проведенный в работе [38] по применению смазочно-охлаждающих технологических средств, используемых при резании труднообрабатываемых материалов, позволил определить некоторые направления применения СОТС при механической обработке металлов резанием.

При механической обработке металлов резанием применяются различные СОЖ, которые можно разделить на два вида: масляные и водные (рис. 1.4).

Так применение в качестве СОЖ минеральных масел для некоторых операции механической обработки является значительной. В тоже время, использование смазочно-охлаждающих жидкостей на основе минерального масла часто связано с функциональными, экономическими и экологическими недостатками.

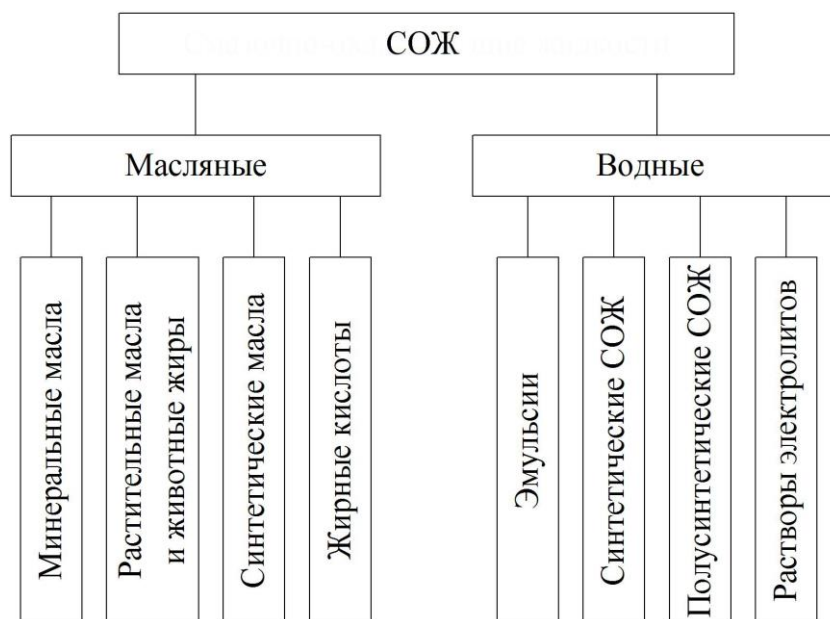


Рисунок 1.4 – Классификация СОЖ [38]

В условия современного производства наибольшее распространение и применение нашли следующие смазочно – охлаждающие жидкости: масляные эмульсии, полусинтетические и синтетические.

Сравнительные характеристики наиболее часто применяемых СОЖ представлены в таблице 1.1.

В зарубежных источниках, помимо различных типов смазочных материалов, можно встретить исследования, посвященные тому, как применяются данные материалы в зависимости от способа подачи в зону резания.

Применение СОЖ в данном случае подразделяют на:

- полив;
- минимальное количество смазки (MQL);
- криогенное охлаждение;

- одновременное использование MQL и криогенного охлаждения;
- твердая смазка.

Таблица 1.1 – Сравнительная характеристика СОЖ [38]

Тип СОЖ	Свойства			Основные недостатки
	смазочные	охлаждающие и моющие	стойкость к био-поражению	
Чистые масла	●●● ●	●	-	Слабые охлаждающие и моющие свойства, пожароопасность, испаряемость, низкие скорости резания
Водосмешиваемые на основе минерального масла (эмульсии)	●●●	●●●	●	Коррозионная активность, рост бактерий
Полусинтетические	●●	●●●	●●●	Возможность пенообразования, влияние жесткости воды на стабильность СОЖ, легкость загрязнения
Синтетические	●	●●●	●●●●	Сравнительно слабые смазывающие свойства, легкость загрязнения

Отмечено, что эти подходы играют важную роль в производственных процессах с точки зрения экономических и экологических аспектов [100].

Применение способа полива СОЖ особенно актуально для процессов абразивной обработки, поскольку предъявляются значительные требования к снижению тепла, связанного с трением, или, соответственно, к охлаждению зоны контакта. Например, в обычном процессе шлифования обычно удельный расход составляет примерно 2–4 л/мин мм [100].

Применение очень малых количеств СОЖ является целью концепции MQL (макс. 50 мл/ч). Подача MQL осуществляется с использованием СОЖ на чистой масляной основе или смеси СОЖ на масляной основе с воздухом, при этом

эффективность смазки является решающим аспектом. Концепция MQL направлена на снижение трения между инструментом и материалом заготовки, а также предотвращение адгезионного схватывания стружки и инструмента. Он в основном применяется в процессах обработки металлов давлением и резанием, но в меньшей степени в процессах абразивной обработки, таких как шлифование. Поскольку небольшое количество СОЖ не позволяет охлаждать всю обрабатываемую поверхность, то MQL-метод значительно ограничивает область его применения в различных производственных процессах [100].

Одним из перспективных направлений является криогенная обработка - охлаждение контактной зоны «деталь - инструмент» специальными средами таких, в частности до  $-196^{\circ}\text{C}$  жидким азотом ( $\text{LN}_2$ ), а также примерно от  $-50$  до  $-78^{\circ}\text{C}$  «снегом» ( $\text{CO}_2$ ). Используются в основном для лезвийной обработки резанием труднообрабатываемого материала (хромоникелевых и титановых сплавов), а также широко применяется при высокоточной (прецизионной) обработки некоторых марок сталей для улучшения показателей качества обработанной поверхности и с повышением износостойкости алмазного инструмента. Иногда криогенное охлаждение применяется для обеспечения требуемой шероховатости обработанных поверхностей в комплексе с токарной обработкой и процессами обработки давлением [100].

Также были проведены эксперименты по объединению одновременной крио-MQL-подачи [100]. Так при шлифовании была достигнута повышенная стойкость инструмента.

Твердые смазочные материалы применяются довольно редко и только для очень специфических операций. Есть примеры исследования влияния графита и борной кислоты, чистого графита, фторида кальция, фторида бария, триоксида молибдена и дисульфида молибдена при шлифовании или «твердом точении» для улучшения шероховатости [100].

Все вышесказанное позволяет говорить о том, что применение СОТС на различных операциях обработки металлов резанием на сегодняшний день все также актуально, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов.

Значительный вклад в изучении механизмов функциональных действий СОТС при лезвийной обработке резанием внесены исследованиями таких крупных научных школ под руководством профессоров, как М.И. Клушин, В.Н. Латышев, Л.В. Худобин и другие. В работах [10, 15, 20] рассмотрено и выявлено, что обработка металлов резанием зависит от свойств обрабатываемого металла и инструментального режущего материала, а также от взаимодействия с внешней средой. Свойства взаимодействующих тел и условия трения определяют механизмы и результаты взаимодействия, что, в свою очередь, влияет на процесс стружкообразования, качество поверхности изделия и износ режущего инструмента.

Одним из ключевых процессов при использовании смазочных материалов, во время обработки резанием металлов, является изучение температуры контактирующих поверхностей. При высоких температурах может произойти окисление и износ материала, что приведет к ухудшению качества обработки и сокращению срока службы инструмента.

При интенсивных режимах резания эффективность смазочной жидкости зависит от особенностей взаимодействия ювенильных металлических поверхностей с компонентами (атомами и радикалами) окружающей среды. Различными исследователями подчеркивается значимость ювенильной поверхности как катализатора химических реакций в процессе резания [50].

П.А. Ребиндер в своей работе отмечает [71], «что при механохимическом разрыве возникают свободные макрорадикалы, которые могут быть и заряженными. Эти радикалы могут далее стабилизироваться, например, при взаимодействии с кислородом воздуха или инициировать цепные реакции». По его мнению, значительное влияние на образование свободных радикалов оказывает свежесформированная поверхность металлов, минералов и других материалов. Также было замечено, что высокая эффективность окисленных масел при трении и резке металлов связана с содержанием в них перекисных соединений, обладающих нестабильной связью  $-O-O$  [84]. В тоже время возникновение перекисных соединений всегда протекает по свободно-

радикальному механизму [10, 102]. По мнению Н.Н. Семенова, перекиси являются «мощным генератором свободных радикалов».

Некоторые исследователи полагают, что при заедании трение вызывает значительные локальные повышения температуры, что приводит к разложению добавок и химическим реакциям их компонентов с вновь образованной металлической поверхностью [12].

В.Н. Латышев определяет процесс резания как уникальную операцию с точки зрения физики и химии. Этот процесс сопровождается формированием ювенильной поверхности, обладающей ненасыщенными валентными связями, а также имеющей дефекты кристаллической структуры и высокую плотность дислокаций и вакансий [46, 51]. Образовавшиеся новые поверхности высвобождают электроны и световые кванты (эффект Крамера), что приводит к воздействию на молекулы СОТС и образованию свободных атомов и радикалов — инициаторов цепных реакций. Высокая реакционная способность радикалов способствует образованию защитных пленок, которые экранируют силы адгезии между трущимися поверхностями и снижают износ режущих инструментов.

Результаты исследований показывают, что при анализе химического взаимодействия компонентов СОТС с металлами в процессе резания необходимо учитывать состояние ювенильных поверхностей и свойства промежуточных частиц, возникающих в результате разрушения нейтральных молекул внешней среды [106].

## **1.2 Влияние свободных радикалов на эффективность обработки металлов резанием**

Радикалы играют ключевую роль в качестве промежуточных частиц, особенно в разветвленных и неразветвленных цепных реакциях химической смазки при металлообработке. В этой связи исследование реакционной способности как простых радикалов (например, Cl, S, I, P и других), так и

сложных органических радикалов в процессе резания становится важной задачей для создания научно обоснованных рекомендаций по синтезу смазочно-охлаждающих технических средств (рис. 1.5). Большое значение в понимании свободно-радикального характера реакций взаимодействия внешней среды с ювенильными металлическими поверхностями при резании сыграли исследования В.Н. Латышева [47, 48]. В его трудах были развиты ключевые принципы создания и использования СОТС, с учётом характеристик свободно-радикальных реакций.

Вещества, обладающие высокой способностью к генерации свободных радикалов, имеют слабые связи между атомами в своих молекулах. К таким веществам относятся органические и водные пероксиды, йод  $I_2$ , фосфор P, хлор  $Cl_2$  и соединения серы. В исследованиях [49] было установлено, что пары веществ, способствующие образованию свободных радикалов, облегчают механическую обработку резанием, увеличивают износостойкость режущих инструментов и снижают температуру и силу резания.

В некоторых случаях пары таких элементов, как натрий, фосфор, сера, йод и газообразный озон, оказывают более выраженное воздействие на резание металлов по сравнению с водными или масляными СОТС.

В исследованиях [49] было установлено, что пары веществ, способствующие образованию свободных радикалов, облегчают механическую обработку резанием, увеличивают износостойкость режущих инструментов и снижают температуру и силу резания. В некоторых случаях пары таких элементов, как натрий, фосфор, сера, йод и газообразный озон, оказывают более выраженное воздействие на резание металлов по сравнению с водными или масляными СОТС.

Эффективность СОТС и масел, содержащих перекиси, в процессе резания объясняется также протеканием радикально-цепных реакций с учетом свободных атомов и радикалов.

Исследования, проведенные в области резьбонарезания с различными СОТС [36, 49], показали, что наилучшую смазочную способность демонстрируют окисленные масла, а также поверхностно-активные вещества (ПАВ) с добавками

йода, серы и хлора. Эти компоненты способствуют возникновению химических реакций смазки в зоне резания, в которых участвуют свободные радикалы (рис.1.6, 1.7).

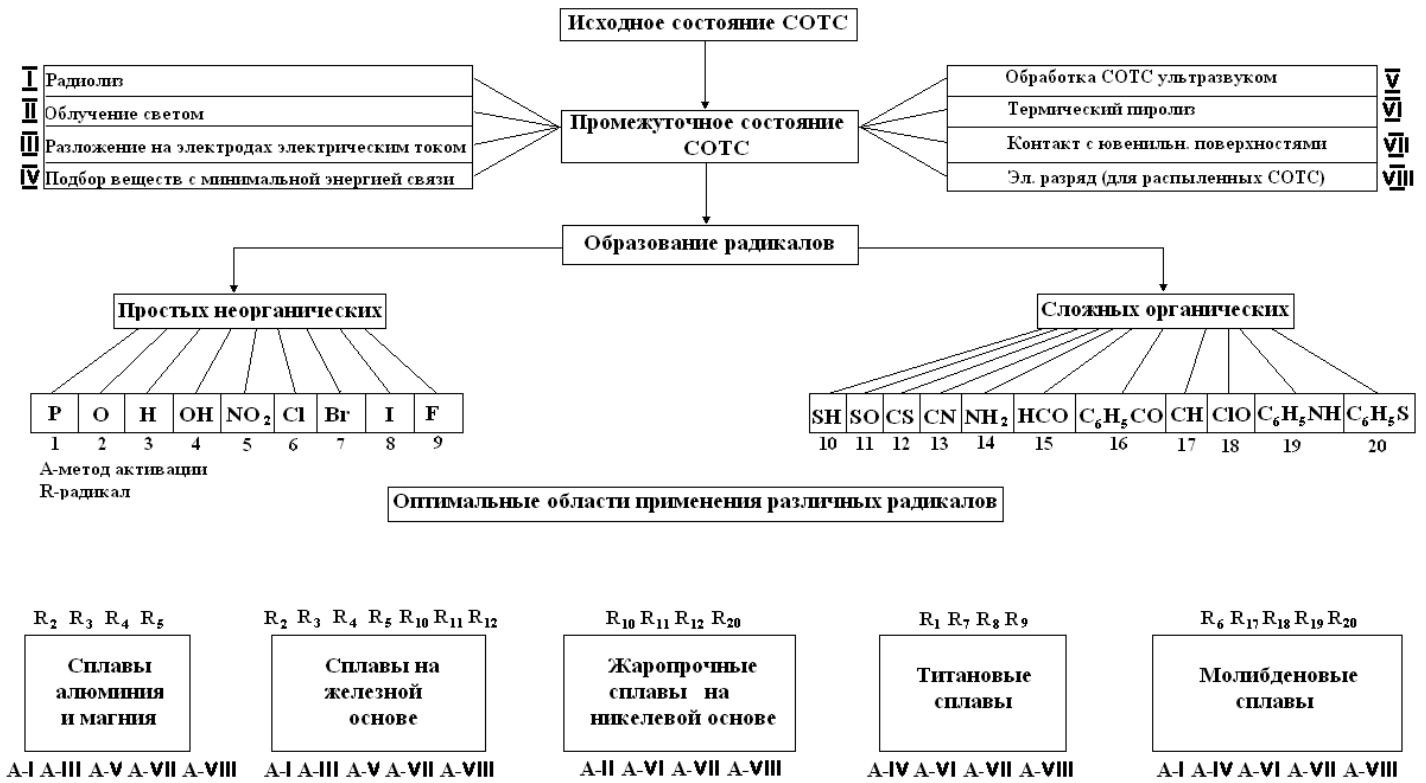


Рисунок 1.5 – Схема образования радикалов

На эмиссию и функционирование выхода электронов значительное влияние оказывает наличие окисных пленок на поверхности металла, которые содержат множество дефектов [14, 105].

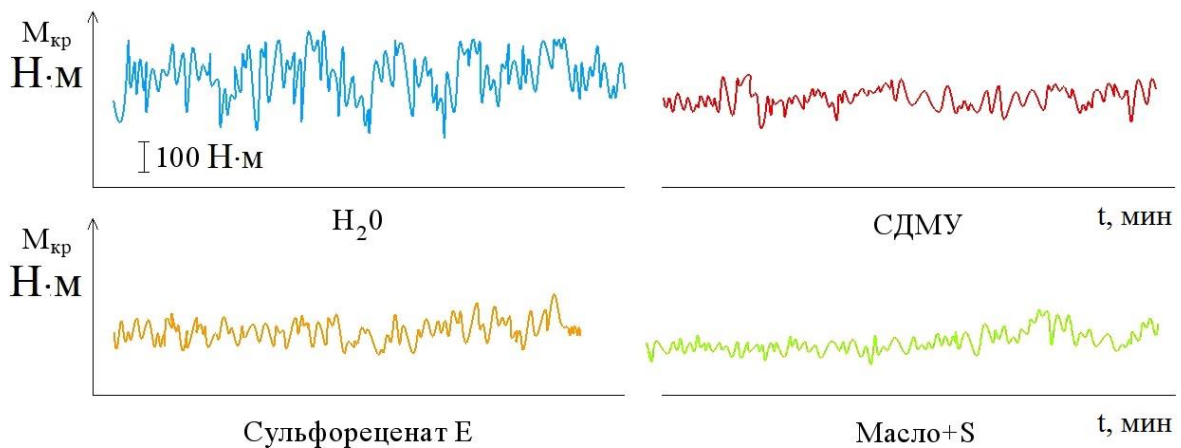


Рисунок 1.6 – Осциллограммы  $M_{кр}$  при нарезании резьбы в деталях из стали 3  $V=2,11$  м/мин,  $M$  14 x 1,5

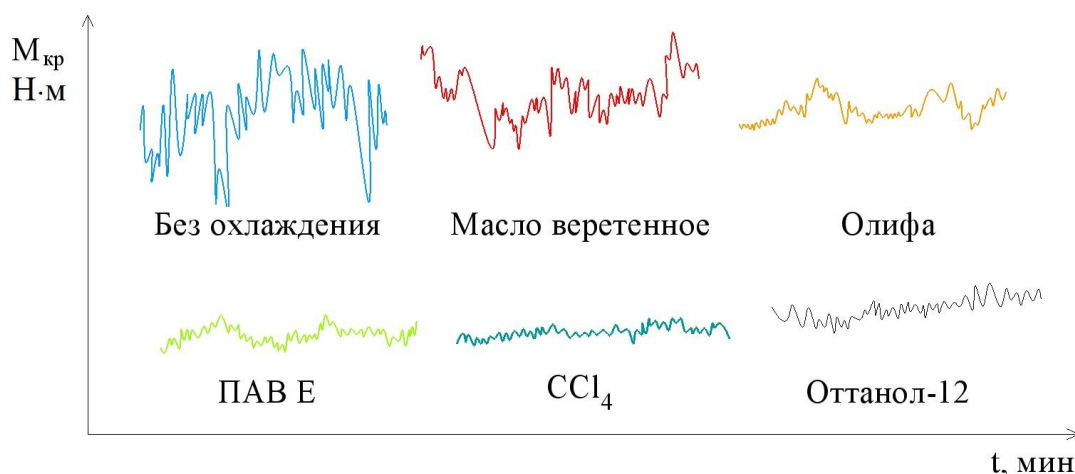


Рисунок 1.7 – Осциллограммы  $M_{кр}$  при нарезании резьбы в деталях из молибдена  
 $V=2,14$  м/мин,  $M 14 \times 1,5$

Установлено, что наличие окисных пленок на поверхности приводит к снижению работы выхода электронов. Интенсификация химических реакций при металлообработке может быть достигнута за счет различных внешних энергетических воздействий на используемую в качестве СОТС среду. Исследования показали, что применение световых излучений способствует увеличению химической активности газовой среды, что приводит к снижению износостойкости режущих инструментов, примерно в 1,5-2 раза по сравнению с необлученной средой. Кроме того, было установлено, что СОТС, образующиеся при разложении реактивных элементов, взаимодействуют со стружкой и помогают стабилизировать колебания ТЭДС [13].

### 1.3 Анализ методов активации СОТС

Как уже упоминалось ранее, новые металлические поверхности, образующиеся в результате фрикционного контакта твердых тел и не содержащие окислов, способствуют активации процессов смазки. Это происходит благодаря эмиссии электронов и образованию частиц с высокой реакционной способностью — свободных радикалов. В специфических условиях контактной зоны, возникающих при трении или резании металлов, могут происходить химические

реакции, которые в обычных условиях, согласно законам термодинамики, невозможны. Установлено, что получение высокореакционных частиц в СОТС, возможно при использовании различных способов энергетического воздействия на смазочный материал [3].

Таким образом, различные методы энергетического воздействия предоставляют возможности для повышения химической активности практически любых смазочных материалов за счет передачи дополнительной энергии. Эти методы могут включать - механическое воздействие, ультразвуковую обработку, электростатическую активацию, лазерное облучение и другие формы энергии, которые могут активировать молекулы смазки и способствовать их реакциям.

При применении таких методов происходит частичное разрушение структуры смазочного вещества, что приводит к образованию новых химических соединений и активных радикалов. Эти продукты распада могут затем взаимодействовать с контактными поверхностями твердых тел, формируя на них пленки различного химического состава. Такие пленки обладают уникальными свойствами, позволяющими им экранировать интерметаллические связи в зоне контакта.

Экранирование интерметаллических связей играет важную роль в снижении трения и износа, так как оно препятствует прямому взаимодействию между металлическими поверхностями. Таким образом, созданные пленки не только уменьшают трение, но и могут улучшать коррозионную стойкость, увеличивать срок службы оборудования и повышать его общую эффективность.

Кроме того, использование различных способов энергетического воздействия позволяет контролировать свойства образуемых пленок, что открывает новые возможности для разработки высокоэффективных смазочных материалов, адаптированных под конкретные условия эксплуатации.

Технологии физической активации СОТС становятся всё более востребованными. Это связано с резким увеличением стоимости СОТС и ужесточением требований к экологичности и санитарно-гигиеническим нормам промышленного производства, особенно в механообрабатывающих цехах.

Вышеизложенные способы позволят существенно улучшить эффективность смазочно – охлаждающих технологических средств, а также обеспечить экономию и снижение материальных затрат, за счет снижения её расхода при резании металла, и, в целом, сокращения общей годовой потребности [8].

#### **1.4 Использование коронного разряда в процессе лезвийной обработки металлов**

Особое место среди различных методов активации СОТС занимает активация коронным разрядом, как одна из наиболее простых в исполнении. Одним из основных условий образования коронного разряда является резкая неоднородность поля. В этой области наблюдаются значительно более высокие значения напряженности электрического поля [70, 82]. Данный вид разряда возникает, в том числе, и при атмосферном давлении.

В работе [7] было установлено, что для возникновения коронного разряда требуется напряженность электрического поля, достигающая примерно 30 кВ/см.

Это значение является критическим для понимания механизмов ионизации газа, происходящих при высоких электрических полях. Коронный разряд представляет собой процесс, при котором электрическое поле ионизирует молекулы газа, создавая свободные электроны и положительные ионы, что приводит к образованию самоподдерживающегося разряда.

Однако экспериментальные данные, представленные в работе [102], указывают на значительно более низкое значение порога ионизации — 4,7 кВ/см.

Это различие в значениях может быть обусловлено несколькими факторами, включая особенности экспериментальных условий, тип газа, используемого в исследованиях, а также геометрию и конфигурацию проводников, вокруг которых измерялась напряженность поля.

Различают униполярный (заряды одного знака) и биполярный (заряды противоположных знаков) коронный разряд. Использование униполярного

коронного разряда в процессе металлообработки получило название метода сухого электростатического охлаждения (СЭО) (рис. 1.8, 1.9) [6, 7, 8, 9].

В ситуации, когда внешнее энергетическое воздействие (СЭО) не переходит в другие виды газовых разрядов, то поток заряженных частиц, участвующих в зоне трения, не оказывает существенного влияния на триботехнические характеристики режущего инструмента. Вместе с тем, анализ результатов исследований [42], показывает, что в процессе резания, износ режущего инструмента зависит от электродиффузионных явлений в зоне контакта.

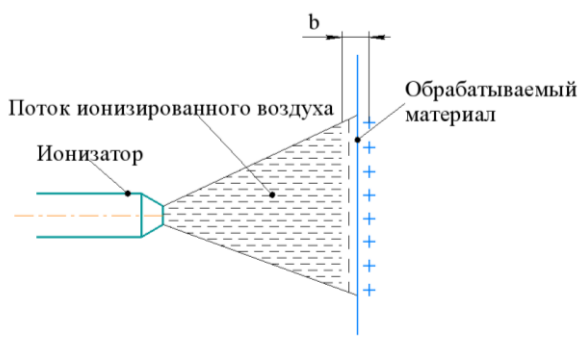


Рисунок 1.8 – Моделирование процесса воздействия СЭО на контактную поверхность, где  $b$  – условная величина толщины слоя, возникающей на границах двух фаз твердого тела и газа



Рисунок 1.9 – Установка сухого электростатического охлаждения Варкаш [7]

Термоток, возникающий в процессе резания, изменяет физические и химические свойства металлов, что может приводить к значительному износу как самого инструмента, так и обрабатываемого материала. Таким образом, влияние термотока на электродиффузионные явления может служить важным фактором, определяющим скорость и характер износостойкости режущего инструмента. При исключении его влияния стойкость инструмента увеличивается в несколько раз.

Результаты исследований, представленные в работах [39, 95], показали положительный эффект от применения ионизированной газовой смеси (ИГС) при механической обработке различных материалов.

Многими исследователями положительно оценивается применения СЭО при обработке металлов [69, 83, 85].

### **1.5 Ионизация СОТС при механической обработке металлов резанием**

В результате исследования процессов, протекающих в ходе ионизации смазочной среды, было обнаружено, что вместе с активными элементами в потоке ионизированного воздуха образуется озон. Озон образуется из кислорода, содержащегося в воздушной среде, под воздействием коронного разряда [98].

Известна высокая реакционная способность озона, и, что он является сильным окислителем с последующим образованием окисных плёнок с особыми свойствами, в частности, как повышенной твердостью, так и смазывающим эффектом. При этом, в результате возможности дальнейшего разложения полимерной добавки в составе СОТС из-за высоких температурно – силовых нагрузок и последующее активационное насыщение молекулами кислорода, что в дальнейшем способствует облегчению тяжёлых режимов трения [94].

Исследования Ф. Боудена, Д. Тейбора, А.С. Ахматовой и В.В. Подгоркова показали, что оксидные слои, формирующиеся под воздействием кислорода и его соединений, существенно уменьшают трение на контактных поверхностях, что, в свою очередь, приводит к снижению износа инструмента.

Исследованиями [48, 49] установлено, что температура в зоне резания будет оказывать различные воздействия на реакционную способность кислорода: в одном случае - формируемый оксидный слой может улучшить, в другом - существенно снизить триботехнические характеристики режущего клина инструмента при резании. В своих экспериментальных исследованиях А.М. Вульф установил, что большинство оксидных пленок, сформированных в условиях лезвийной обработки резанием, имеют различные свойства и могут оказывать неоднозначное влияние на трибосопряжения между инструментом и обрабатываемым материалом, поскольку железо обладает несколькими оксидами:  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Было выявлено, что  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  увеличивает износ режущего

инструмента, в тоже время  $Fe_3O_4$  позволяет снизить коэффициент трения, что положительно влияет на период стойкости инструмента.

Результаты работы [59] позволяют говорить о положительном эффекте применения коронного разряда при точении труднообрабатываемых материалов.

Работой [102] установлено, что активность кислорода на ювенильных поверхностях во многом определяется его состоянием в контактной зоне. Образование смазочных пленок на основе оксидных соединений возможно при наличии нестабильных частиц вещества в зоне резания. В то же время, для повышения эффективности данных частиц нужно обеспечить необходимое количество кислорода.

Внешнее энергетическое воздействие может активировать молекулы в смазочной среде, что приводит к образованию реакционноспособных частиц, способствующих химическим реакциям. При правильном подборе компонентов среды возможно создание специфических условий, при которых возникают окисные пленки и интерметаллоидные соединения на поверхности режущего инструмента и стружки. Такие покрытия могут значительно улучшить эксплуатационные характеристики инструментов, включая их износостойкость, твердость и коррозионную стойкость. Применение активных присадок различного функционального назначения в совокупности с энергетическим воздействием позволит улучшить характеристики применяемых СОТС.

## **1.6 Применение присадок высокомолекулярных соединений для повышения эффективности СОТС**

Основу полимерсодержащих СОТС составляют высокомолекулярные соединения с заранее установленными физико-химическими характеристиками [96].

Определены ключевые физико-химические закономерности воздействия полимерных составов на процесс обработки твердых материалов:

— оптимальные условия использования полимерных материалов в процессе резания располагаются в зоне высоких режимов, значительных усилий деформации металлов и повышенных температур;

— наблюдается явная зависимость эффективности полимерных составов от химического строения полимеров, а также от их физико-химических свойств, включая молекулярную массу и концентрацию в смазочной среде;

— при использовании составов, содержащих полимеры, наблюдается определённая зависимость эффективности обработки от физико-механических и физико-химических свойств обрабатываемого материала. Так же, как правило, зависимость стойкости режущего инструмента от скорости обработки имеет вид кривой с максимальным значением [89].

В ранних исследованиях [25, 26] различных ученых вопрос о полимерных СОТС рассматривался в контексте процессов фрезерования, шлифования и резбонарезания. Однако внимание к точению уделялось значительно меньше, хотя этот процесс занимает более значительную долю в общем объеме металлообработки в современном машиностроении. Результаты, проведенных экспериментов [28, 35], демонстрируют, что использование полимерных СОТС при лезвийной обработке сталей значительно увеличивает период стойкости режущего инструмента, снижает шероховатость поверхности, а также уменьшает энергозатраты в процессе механической обработки. Высокая эффективность и универсальность действия СОТС с полимерными добавками объясняется тем, что в его составе присутствуют растворенные или диспергированные высокомолекулярные соединения. Эти соединения проходят через несколько стадий преобразований, известные как термомеханодеструкция, в процессе механической обработки. Эти преобразования происходят под воздействием различных факторов, таких как, температура в области резания, трение и эмиссия электронов из обрабатываемого материала во время его разрушения. При деструкции полимера в зоне резания выделяются сложные органические радикалы, имеющие повышенную химическую активность по отношению к ювенильной поверхности. Образовавшиеся в процессе деструкции макрорадикалы

могут вступать в различные реакции, в результате которых получаются конечные продукты линейного, разветвленного или сетчатого строения. Свободные макрорадикалы могут инициировать реакцию деструкции.

В процессе химических преобразований полимера образуются соединения, обладающие высокой химической активностью. Эти соединения, хотя и не являются конечными продуктами реакции, играют важную роль в различных процессах, происходящих как в самой полимерной системе, так и на каталитически активной поверхности металла. В результате этих процессов в зоне обработки накапливаются разнообразные химически активные продукты [28, 29, 30].

Полиэтиленгликоль и добавки на его основе зарекомендовали себя как высокоэффективные полимерные СОТС, что подтверждено проведенными исследованиями [89]. Полимеры, составляющие СОТС, под воздействием высокой температуры и механических напряжений адсорбируются на металлической поверхности, что приводит к их механо- и термодеструкции. В результате этого процесса образуются высокоактивные фрагменты макромолекул, обладающие значительной химической активностью. Эти фрагменты способны взаимодействовать с обрабатываемым материалом, снижая уровень его свободной поверхностной энергии и облегчая процессы деформации и разрушения. При наличии кислорода в составе полимера, особенно в главной цепи, скорость деструкции увеличивается.

Гигроскопические свойства полигликолей определяются количеством гидроксильных групп. С увеличением молекулярной массы и числа эфирных связей гигроскопичность уменьшается. Чистые полиэтиленгликоли хорошо растворяются в воде. В процессе их производства можно регулировать молекулярную массу полиэтиленгликоля. Полигликоли являются прекрасными СОТС для металлообработки. Они обладают свойствами, позволяющими растворяться в воде в любых пропорциях, при этом гидролитическая стабильность не зависит от качества и жесткости воды. Эти вещества обеспечивают отличные смазывающие характеристики, способствуют

смачиванию и обладают высокой проникающей способностью водных растворов. Кроме того, они неионогенные, имеют низкую токсичность и не вызывают коррозионного воздействия на большинство металлов. В полимерсодержащих СОТС, где рабочий раствор представляет собой «истинный», проблема расслоения отсутствует. В этих системах полимер, добавляемый в состав, выполняет функцию смазки. Макромолекулы полимера или полимерные частицы, попадая на поверхность режущего инструмента и стружки, разрушаются по основным связям, что приводит к образованию свободных макрорадикалов. Температурные пределы разрушения полимеров значительно ниже, чем у жидких углеводородов. Фрагменты разорванных макромолекул формируют химические связи с неокисленными поверхностями металлов, прежде всего с атомами никеля, марганца, алюминия, железа и хрома [62].

В исследовании [69] предполагается, что значительное упрощение процесса резания при использовании СОТС с добавлением полимеров связано с образованием водорода, который может возникать в результате деполимеризации макромолекул полимера, либо из-за катализатора на металлической поверхности, взаимодействующего с водородосодержащими продуктами. Установлено, что при сверлении стали 45 эффективность СОТС, содержащих полимеры, увеличивается примерно в два раза.

Экспериментальные данные, полученные в ходе исследования полимерсодержащих СОТС, продемонстрировали их благоприятное воздействие на срок службы режущего инструмента, качество обрабатываемой поверхности и эффективность охлаждения. В исследованиях [103, 104] подчеркивается положительное влияние использования добавок на полимерной основе, содержащих полиалкиленгликоль и полимерные эфиры, при механической обработке алюминиево-марганцевых и титановых сплавов. Положительный результат применения СОТС с полимерными присадками [37] на износостойкость режущего инструмента для токарной обработки, по сравнению с обычными СОЖ, объясняется проявлением специфической реакции на контактные процессы при

резании, в виде формирования особого полимерного слоя при адсорбции СОТС, а также характером деформационных явлений, происходящих в металле.

И.А. Буяновский, по результатам анализа некоторых ключевых направлений совершенствования прикладных трибологических изысканий в части процессов изнашивания при трении твердых тел в условиях граничного смазывания с формированием адсорбционного слоя [16], отмечает эффективность такого процесса как трибополимеризация. В работах Ю.С. Заславского и Р.Н. Заславского предлагается идея применения в виде присадок «полимеров трения», обладающие рядом уникальных свойств [29, 110]. В частности, применение для эффективного снижения трения и износа несущих частей трибосопряжения непредельные углеводороды (мономеры и олигомеры), обладающие рядом свойств: способность образовать особые пленки со смазывающими и защитными свойствами с последующей непрерывной регенерацией их в процессе трибоизнашивания защитного полимерного слоя. На основе которых предложены уникальные модели органических соединений, позволившие разработать серию промышленных присадок с большой эффективностью применения в трибопарах [30]. Аналогично вышеизложенному, широкое применение нашли ацетиленовые и олефиновые трибополимеробразующие присадки с повышенной противоизносной способностью введенные в соединения групп:  $—ОН$ ,  $—СООН$ ,  $—СНО$ ,  $—COOR$  и некоторые другие приводящие к значительному снижению износа и значительному улучшению антифрикционных свойств [2]. Металлополимерные комплексы, образовавшиеся в контактной зоне трения, как результат химического соединения, обладают большим противоизносным эффектом, чем те, которые не образуют соединения с такими материалами. Особо надо отметить, мономеры или олигомеры должны иметь конфигурации и конформации, обеспечивающие легкую хемосорбцию соединений на поверхностном слое обрабатываемого материала [16].

## Выводы по главе 1

1. Рассмотрены методы и основные тенденции повышения эффективности лезвийной обработки резанием, а также проведен анализ физико-химических явлений, протекающих в контактной зоне при резании металла. Установлено, что применение СОТС с различными добавками в его составе, снижает трение и износ режущего инструмента, за счет образования химических пленок на контактирующих поверхностях, позволяющих в последующем обеспечить значительное форсирование режимов резания.

2. Установлено, что разработка научных основ и применение технологии энергетической активации СОТС с ПАВ и кислородсодержащими полимерными присадками в металлообработке является актуальной научно-технической задачей, позволяющей решать вопросы повышения эффективности лезвийной обработки резанием металлов при обеспечении высоких показателей качества обработанной поверхности и в целом экологичности процесса.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ В КОНТАКТНОЙ ЗОНЕ РЕЗАНИЯ ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ СОТС С ПОЛИМЕРНЫМИ ПРИСАДКАМИ**

### **2.1 Механизм смазочного действия СОТС с кислородсодержащими присадками**

Химические реакции на поверхности твердых тел, таких как стружка или режущий инструмент, представляют собой сложные процессы, в которых участвуют возбужденные частицы, ионы, свободные атомы и радикалы. Эти активные частицы играют ключевую роль в изменении свойств материалов и образовании новых соединений и фаз. Это связано с тем, что в процессе взаимодействия между твердыми телами и смазочными веществами, именно активные формы вещества обладают высокой реакционной способностью и способны инициировать необходимые химические процессы.

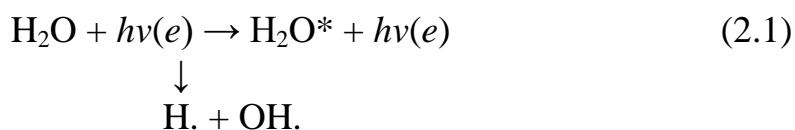
Кислород, в своем молекулярном состоянии, является инертным в химическом отношении. Однако его реакционная способность значительно возрастает, когда он переходит в атомарное состояние. Этот переход, может быть, достигнут благодаря различным методам активации, такими как - термическая диссоциация, электрические разряды, ультразвуковая обработка или лазерное облучение. Например, при термической диссоциации молекулы кислорода распадаются под воздействием высокой температуры, что приводит к образованию активных атомов кислорода.

Аналогично, электрические разряды могут ионизировать молекулы кислорода, создавая свободные атомы и радикалы, которые обладают значительно более высокой реакционной способностью. Эти активные формы кислорода могут взаимодействовать с поверхностями твердых тел, инициируя окислительные

реакции, которые приводят к образованию новых химических соединений и активных пленок на поверхности [65].

Эти виды внешнего энергетического воздействия на СОТС интенсифицируют окислительные процессы и повышают химическую активность среды. Воздействие различных источников энергии на СОТС приводит к распаду нейтральных молекул СОТС на свободные атомы и радикалы.

Образование свободных радикалов, в результате внешнего энергетического воздействия, при обработке металлов резанием можно представить в виде схемы:



где  $\text{H}_2\text{O}^*$ ,  $\text{O}^*$  — возбужденные молекулы воды и кислорода;  $h\nu(e)$  — энергия (электрон), эмитируемая ювенильной поверхностью;  $\text{H} \cdot$ ,  $\text{OH} \cdot$ ,  $\text{O} \cdot$  — химические радикалы.

При взаимодействии гидроксильных радикалов образуется перекись водорода, эффект которой при резании обусловлен способностью выделять активный кислород.

В тоже время, если свежееобразованные поверхности металла обладают свободными валентностями, то радикалы могут образовываться в результате механического разрушения молекул [64]. Образовавшиеся смазочные пленки, в результате реакций активных радикалов, уменьшают адгезию между трущимися поверхностями, что положительно влияет на параметры резания [50].

Исследования показывают [46, 47, 55], что химические реакции, происходящие при резании металлов с использованием смазочно-охлаждающих технических средств, в большинстве случаев имеют свободнорадикальный характер. Этот тип реакций характерен для процессов, в которых участвуют высокорреакционные молекулы, называемые свободными радикалами, которые имеют неспаренные электроны и, следовательно, обладают высокой реакционной способностью. Свободные радикалы играют ключевую роль в иницировании и поддержании химических процессов, таких как окисление, полимеризация и

разложение, что делает их важными участниками в механизмах взаимодействия между инструментом и обрабатываемым материалом.

Эффективность смазочного действия среды в значительной степени определяется интенсификацией разложения смазочного материала на активные частицы. Этот процесс может быть усилен за счет различных факторов, таких как температура, давление и состав смазочных материалов. При повышении температуры, например, увеличивается скорость разложения смазочных компонентов, что приводит к образованию большего количества активных частиц, способствующих улучшению смазочных свойств.

Полимерные присадки с высоким содержанием кислорода представляют собой перспективный подход к повышению эффективности СОТС при лезвийной обработке металлов. При деструкции полимеров образуются свободные радикалы, которые способны присоединять молекулы кислорода, образуя новые активные формы. Это взаимодействие не только увеличивает концентрацию активных форм кислорода в смазочной среде, но и способствует образованию защитных пленок на поверхности обрабатываемого металла. Эти защитные пленки могут значительно снижать трение и износ, а также повышать коррозионную стойкость, что делает использование кислородсодержащих полимерных присадок особенно перспективным в области металлообработки.

Таким образом, изменение состава СОТС использованием полимерных добавок с высоким содержанием кислорода может привести к значительному улучшению эксплуатационных характеристик при резании металлов [49, 61].

Кроме того, многие современные смазочные материалы содержат высокомолекулярные соединения, которые могут значительно влиять на их характеристики и эффективность [54, 62]. Эти соединения способны улучшать физико-химические свойства СОТС, такие как вязкость, адгезия и устойчивость к механическим воздействиям. Также высокомолекулярные соединения могут оказывать влияние на взаимодействие СОТС с обрабатываемыми материалами, что может привести к улучшению качества обработанной поверхности и повышению работоспособности режущих инструментов. Таким образом,

использование высокомолекулярных соединений в современных СОТС открывает новые возможности для оптимизации процессов обработки материалов.

Смазочно-охлаждающие технологические средства с присадками полимеров, подвергнутые различным методам активации, значительно улучшают свои смазочные свойства.

Экспериментальные данные и результаты исследований в области химической кинетики [77, 78] свидетельствуют о том, что скорость химических реакций, процессы образования свободных радикалов и атомов могут быть ускорены при использовании электростатического метода активации СОТС.

Ключевым фактором, влияющим на химическую активность СОТС, является способность их активных молекул распадаться на реакционные частицы — атомы и радикалы. Поддержание разветвленных химических реакций и стабильных химических пленок на контактных поверхностях невозможно без постоянной генерации радикалов.

Образование поверхностных радикалов в процессе резания происходит из-за разрыва связей в молекулах СОТС, что вызывается свободными валентностями, взаимодействующими с молекулами окружающей среды, а также воздействием температуры и физическими факторами на СОТС.

Исследование механизма взаимодействия радикалов с металлическими поверхностями позволит регулировать химические реакции во время резания, создавать защитные пленки на режущем инструменте и стружке, а также учитывать активацию реакций различными методами, включая физические.

Правильный выбор компонентов среды и методов активации способен инициировать необходимые реакции, приводящие к образованию окисных пленок и металлополимерных соединений с заданными характеристиками.

Внешние энергетические воздействия на СОТС с полимерными присадками, такие как коронный разряд, способствуют окислению и химическому взаимодействию с образованием промежуточных элементов, свободных атомов и радикалов. Вещества с неустойчивыми связями, такие как полимеры, с боковыми

цепями, имеют тенденцию к образованию свободных атомов и радикалов, что может сопровождаться разрушением основной цепи полимера.

## **2.2 Применение различных моделей в области обработки металлов резанием при определении изнашивания режущего инструмента**

Согласно многочисленным исследованиям [20, 36, 90], при обработке резанием из-за изнашивания режущего клина инструмента происходит адаптация и изменение формы трущихся, контактирующих поверхностей с последующим обязательным распределением в контактной зоне средней температуры и действующих напряжений, даже при постоянной обработке без смазочно-охлаждающих средств и покрытий. Это влияет на интенсивность износа режущего инструмента, который связан с распределением нагрузок и температур.

Механизм износа сложен и зависит от условий резания, в которых инструмент может подвергаться различным видам износа [99].

Анализируя теоретико-экспериментальные работы в области обработки металлов резанием, а также согласно многочисленным исследованиям (Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макаров, В.Н. Латышев, С.С. Силин, С.Н. Григорьев, А.С. Верещака) интенсивность износа от скорости резания для различных видов износа можно представить условно в виде следующей схемы (адгезия, усталостный износ, абразивный износ и т.д.) (рис. 2.1). При этом наблюдаются минимальные значения. Анализ классической кривой зависимости износа инструмента от длины пути резания показывает, что согласно исследованиям состоит из 3 участков: 1 - зона приработки, 2 - зона нормального износа, 3 - зона катастрофического износа.

При этом следует отметить, что многочисленные исследования подтверждают возможность влияния на каждый из участков для повышения износостойкости инструмента (рис. 2.2).

Для оптимизации обработки резанием с обеспечением минимума износа

режущего инструмента применительно к различным их типам изнашивания используются различные эмпирические зависимости, в частности при определении расчетной величины диффузионного изнашивания наиболее приемлемой зависимостью является теоретическая формула для стойкости, предлагаемая Г.Н. Лоладзе.

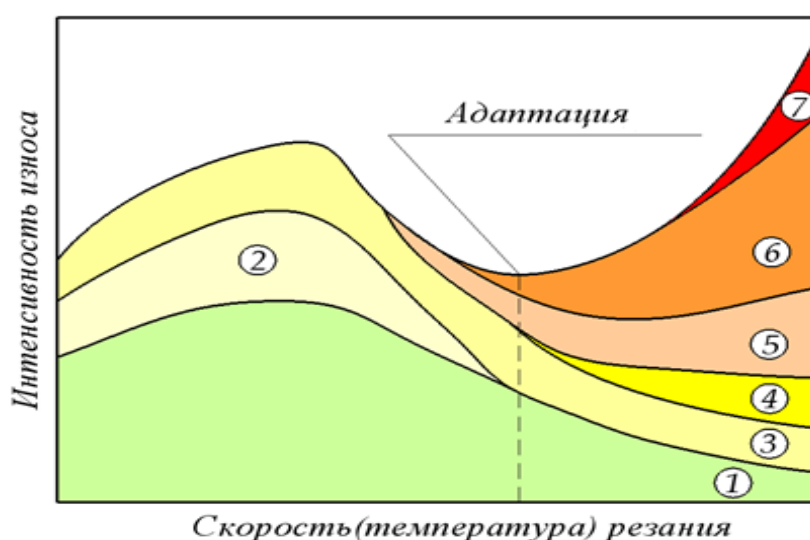


Рисунок 2.1 – Зависимость характера интенсивности износа инструмента от скорости (температуры) резания при различных составляющих трения:  
 1 – адгезионная; 2 – усталостная; 3 – абразивная; 4 – термоусталостная;  
 5 – окислительная; 6 – диффузионная; 7 – пластическая

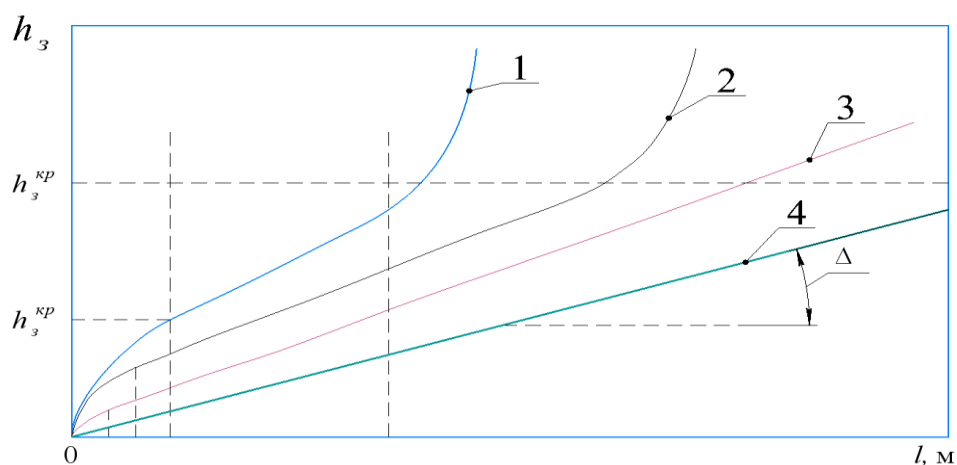


Рисунок 2.2 – Влияние пути резания на износ инструмента

И.В. Крагельский получил формулы для расчёта износа трущихся поверхностей [92]. Ю.Г. Кабалдин в своих работах анализирует износ

инструмента со структурно-энергетических позиций [33, 34]. Вместе с тем, точное расчетное определение величины интенсивности износа инструмента и других параметров обрабатываемости с учетом особенностей протекания всех видов изнашивания при лезвийной обработке резанием в настоящее время не представляется возможным по ряду как объективных, так и субъективных причин.

И как результат этого, решение данной проблемы сводиться к расчету основных выходных параметров, путем применения степенных зависимостей, учитывающие особенности поведения режущего инструмента в области определенных (заданных) ограничений. Большая часть этих полуэмпирических зависимостей для определения величины износа приведены в таблице 2.1, и они базируются на применение внутренних и выходных параметров лезвийной обработки резанием, в частности - в пределах принятых моделях износа; с учетом средней температуры и составляющих усилия резания; напряженно - деформированного состояния режущего клина; работу и степени влияния упругой и пластической деформации в контактных процессах; наличие удельных нагрузок и другие. И в дальнейшем, с учетом особенностей, присущих к конкретным условиям резания, применяются поправочные коэффициенты, в большинстве случаев, на снижение режимов резания. В большинстве полученных зависимостях, результаты эксперимента остаются исходными данными для оптимизации и определения выходных характеристик лезвийной обработки резанием в виде различных степенных зависимостей, учитывающие особенности поведения режущего инструмента в заданном диапазоне работы. Большая часть эмпирических зависимостей, приведенных в таблице 2.1, основываются на внутренних и выходных параметрах обработки резанием таких, как температура резания, степень пластической деформации, касательные напряжения, удельные нагрузки и др., и используются при расчёте величины (интенсивности) износа инструмента, путем использования поправочных коэффициентов, учитывающих определенную модель изнашивания, а также специфических условий резания. В большинстве случаев при этом практически не учитываются применение таких важных и эффективных интенсификаторов повышения эффективности лезвийной

обработки резанием, как разработка и использование современных смазочно-охлаждающих технологических средств, инновационных многослойных наноструктурированных износостойких покрытий, работы при форсированных и переменных режимах обработки и др.

При наличии большого объема теоретико - экспериментальных исследований в области резания металлов и значительных успехов в триботехнике, создание универсального метода определения износостойкости режущего инструмента было сложным из-за множества неконтролируемых процессов и параметров. И как результат, основная часть исследований в этой области носит экспериментальный характер во-первых, и во-вторых, процесс лезвийной обработки резанием металлов сложен как с точки зрения формализации, так и с точки зрения его многофакторности и взаимосвязанностью, как входных (скорость резания, подача инструмента и т.д.), так и выходных параметров ( износостойкость инструмента, температура и составляющие усилия резания, применение СОТС и т.д.) при сосредоточении всего этого на малом контактном объеме. Основные результаты этих научных изысканий по износу и периода стойкости инструментального материала представлены в таблице 2.2. При этом основополагающей зависимостью остается формула Ф. Тейлора [53], учитывающая связь стойкости режущего инструмента со скоростью резания в виде:

$$V \cdot T^m = C_T \quad (2.2)$$

Таблица 2.1 – Эмпирические зависимости для определения износа [58]

№	Год	Автор	Формула износа	Тип износа
1.	1937	Тонн В.	$\varepsilon = kH + b$	абразивный
2.	1940	Хольм Р.	$W = zP/H$	атомарный
3.	1941	Хрущов М.М., Бабичев М.А.	$\varepsilon = kH$	микрорезание
4.	1952	Баруэлл Дж.Т	$W = kP/H$	адгезионный
5.	1953	Арчард Ж.Ф.	$W = kP/H$	адгезионный
6.	1952	Оберле	$W = E/H \cdot 10^6$	адгезионный
7.	1958	Крагельский И.В.	$J_h = i_h \cdot A_r / A_0$	усталостный

Продолжение таблицы 2.1

8.	1958	Иошimoto Г., Цукизоэ Т.	$W = \frac{1}{6} \operatorname{tg}\theta(P/H)$	окислительный
9.	1960	Шалломах Л.И. Тернер	$W = \frac{1}{2} \gamma \cdot S^2 k_i \cdot a^2$	абразивный
10.	1962	Бейер, Клинтон, Нельсон, Шумахер	$\frac{hf}{2000} = (\gamma_R \cdot \tau_y / \tau_{\max})^9$	усталостный
11.	1965	Рабинович Е.	$W = P \operatorname{tg}\theta / \pi H$	абразивный
12.	1972	Павелеску П.	$W = A_0 + A_1 \cdot HR + \dots$	комплексный
13.	1974	Су	$W = \left[ \frac{B_1 h_1}{d_c(1)} + \frac{B_2 h_2}{d_c(2)} \right] \frac{P}{H}$	отслоение

Таблица 2.2 – Эмпирические зависимости для оценки обрабатываемости и расчета износостойкости режущего инструмента [58]

№ п/п	Авторы	Аналитические зависимости	Параметры для определения обрабатываемости и их соответствие (+ да; – нет)							Вид зависим ости, использ уемая теория	
			I	II	III	IV	V	VI	VII		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1.	Тейлор Ф.	$TV^m = C$	–	–	–	–	–	–	–	–	Эмпири ческая
2.	Кроненберг Г.	$T(V + V^m) = C$	–	–	–	–	–	–	–	–	// –
3.	Депиройкс В.	$Te^{a_v b} = C$	–	–	–	–	–	–	–	–	// –
4.	Флорек	$Te^{(V+V_0)^2} = C$	–	–	–	–	–	–	–	–	// –
5.	Сафонов А.Н.	$T = e^{Q-bV}$	–	–	–	–	–	–	–	–	// –
6.	Фельдштейн Э.И.	$V_T = C \cdot (HB) / (HB)^{m_v}$	–	–	–	–	–	–	–	–	// –
7.	Янитский В.М.	$V_{60} = \frac{C}{HB^{1,63}} \cdot \psi^{1,01} HB$	+	–	–	–	–	–	–	–	// –
8.	Хенкин С.Э.	$V_{60} = \frac{A_1 \cdot k}{f^a b^{1-a} HB(1-\psi/100)^{1/2}}$	+	–	–	–	–	–	–	–	// –
9.	Колдинг	$VT \lg \left[ \frac{z_1}{z_2} \left( \frac{q(m_1 - m_2)}{T^{e-T}} \right) \right] = \lg T \cdot zq^m$	+	+	–	–	–	–	–	±	размерн ый анализ

Продолжение таблицы 2.2

10.	Рейхель В.	$T \cdot \theta^b = C$	-	-	-	-	-	-	+	- // -
11.	Армарего И.Дж.А. и Браун Р.Х.	$V \approx \sigma \cdot HB$	±	-	-	-	-	-	±	теория упругос- ти
12.	Такеяма М. и Мурата И.	$W = CL + Be^{E/D \cdot \theta t}$	±	±	-	-	-	-	+	теория диффуз- ии
13.	Хо Г. и Чен К.	$0,9\rho W = \rho k A^{0,75} \cdot V \int_0^T h f^{0,525} dt +$ $+ 1,13G \left( \frac{md}{m} \right) k \sqrt{V} \cdot \int_0^T C_0 \sqrt{D} h_f dt$	±	±	-	-	-	+	+	Теория диффуз- ии и адгезио- нного взаимо- действи- я
14.	Лоладзе Т.Н.	$L = C \frac{\sigma^4}{\chi \cdot a \cdot \varphi_m \cdot a^z \cdot \tau_k^x \cdot \tau_\phi^y}$	±	±	±	-	-	+	+	- // -
15.	Макаров А.Д., Шустер Л.Ш., Дмитриев А.С.	$h_{оп} = A \cdot \tau_n^B$	+	±	+	-	-	+	+	Теория адгезио- нного взаимо- действи- я
16.	Силин С.С.	$h_{оп} = \frac{4\omega \cdot a_1 \cdot \sin^{0,1} \alpha}{ak^2 \cdot A^2 \cdot E^{0,2}} \times$ $\frac{1}{\left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2,65 \cdot FD^{0,3}}{k^2 \cdot A \cdot \sin^{0,065} \alpha}} \right)}$	+	+	+	+	-	+	+	Теория подоби- я
17.	Башков В.М.	$J_h = kq_i \cdot \tau_0^{m/2} \cdot Eu^{m/2} \times$ $\times \left[ \frac{kn \cdot f_M}{\sigma_0(\theta)} \right]^{t^n} \cdot \Delta^{0,4t^n}$	±	+	+	+	-	±	±	Молеку- лярно- механи- ческая теория

Продолжение таблицы 2.2

18.	Хает Г.Л.	$T = \frac{T\rho_0 \cdot M_\rho}{M} (B)^\alpha \cdot f / f_0 +$ $+ \frac{Tu_0 \cdot M_u}{M} \cdot \frac{1}{1 + C \left( \frac{A_r}{V} \right)^2}$	-	-	-	-	+	-	-	Теория колебан ий
19.	Шустер Л.Ш.	$J_{h_0} = A_2 \cdot (\tau_{m_0} / HV_0)^{B_2}$	+	+	+	-	-	-	+	Адгезио нный

Дополнительные сведения к таблице 2.2:

I – степень влияния свойств обрабатываемого материала;

II – степень влияния физико-механических и теплофизических свойств режущего инструмента;

III – учет влияния контактного взаимодействия;

IV – учет влияния усталостных явлений в контакте;

V – учет влияния податливости системы СПИЗ;

VI – оптимальность режимов резания;

VII – учет влияния температуры.

В работе Ф. Тейлора [53] представлена зависимость, учитывающая степени влияния геометрических параметров инструмента и сечения срезаемого слоя на величину скорости резания.

$$V = \frac{C \left( 1 - \frac{0,72}{r^2} \right)}{[0,03949]^{(0,4+2,12/5+h_3^2 r)} \left[ \frac{1,5t}{r} \right]^{(0,13+0,613\sqrt{2})} \cdot \frac{r}{7,352 + 1,88z}} \quad (2.3)$$

Одним из главных недостатков этой зависимости проявляется в ее громоздкости и трудоемкости при практических расчетах, также не полностью обеспечивают точность и надежность расчетов при существенных ограничениях областей режима резания, иногда имеет место значительное несоответствие для обрабатываемого и инструментального материалов при их отношении к одному классу. Выражение (2.3), в противоречие результатам исследований других ученых [93, 109], предполагает возрастание периода стойкости при снижении

скорости резания (вплоть до нуля), хотя является общеизвестным экстремальность зависимости с одним или даже двумя минимумами по периоду стойкости. Исходя из вышеизложенного и исключения вышеизложенных противоречий, были предложены выражения, учитывающие степень влияния на период стойкости инструмента режимов резания (скорости, подачи и глубины резания), а также важное практическое значение приобрела возможность определения скорости резания при постоянном значении периода стойкости в таблице 2.2 для  $T - V_T$ .

По результатам дальнейших исследований в области изнашивания режущего клина инструмента было выявлено значительное влияние физико-механических свойств (прочность, пластичность и др.) обрабатываемой детали на износостойкость режущего инструмента и период его стойкости в таблице 2.2.

Значительный вклад в дальнейшее развитие по установлению влияния режимов резания ( $V, S, t$ ) на температурно – силовые параметры процесса резания внесло применение Г. Кроненбергом метода размерности величин и получить зависимость, позволяющая оценить степень их взаимозависимости, а также степень влияния теплофизических характеристик обрабатываемого материала, таких как удельная объёмная теплоёмкость, коэффициенты температуропроводности и теплопроводности. Выявленная взаимосвязь позволила установить непосредственную зависимость периода стойкости режущего инструмента от температуры в зоне резания, так называемый принцип Рейхеля в виде:

$$T \cdot \theta^b = C \quad (2.4)$$

где  $b$  и  $C$  – коэффициенты учитывают физико-механические характеристики контактирующих материалов и особые условия резания металлов.

При удобстве использования этой формулы, с целью получения обобщающих зависимостей по экспериментальным данным, результаты применения теории размерности полностью не соответствуют физической природе рассматриваемых явлений, вследствие невозможности учета технологических параметров лезвийной обработки резанием. В ряде работ [53,

95], отдается предпочтение на использование как элемента критериев обрабатываемости критическую длину пути резания ( $l_{кр}$ ), соответствующую условно принятому критерию затупления режущего инструмента ( $h_{з\ кр}$ ), который соответствует работе усилий трению в процессе обработки. Согласно работе [53], при существенных изменениях условий и режимов лезвийной обработки резанием принцип Рейхеля не подтверждается, и как следствие, показатель степени ( $b$ ) нельзя использовать как основной параметр физических явлений, определяющих износ и износостойкость обрабатываемого инструмента.

В этой связи, наиболее соответствующим, универсальным и энергетически обоснованным может служить модель, описанная и предложенная Силиным С.С. на основе метода подобия применительно к относительному поверхностному износу инструмента ( $h_{оно}^o$ ), путем использования таких критериев подобия, как Пекле, Фурье, Био, Кирпичникова и другие.

Как показывает анализ данных таблицы 2.2, отсутствуют количественные исследования интенсивности износа режущего инструмента с износостойкими покрытиями и в условиях работы с СОТС, а также следует отметить, что на процесс изнашивания существенное влияние оказывают такие факторы, как переменность режимов резания в процессе обработки (торцевое точение, на станках с ЧПУ и АдСУ и др.), в условиях существенных внешних и внутренних нестационарностей, переменности физико-механических свойств как обрабатываемой детали, так и режущего инструмента.

### **2.3 Общий энергетический анализ процессов трения при резании**

Энергетический подход [60, 63] к оценке трения и износа в последнее время получает все большее развитие. Универсальность такого подхода, основанного на структурно-энергетической теории разрушения металлов, связано с теорией о независимости удельной энергии разрушения от вида подводимой энергии (тепловой, механической и т.д.). Это позволяет проводить аналогию между

процессами пластической деформации, разрушения, плавления и использовать термодинамику неравновесных процессов для расчета условий разрушения при любом виде механического воздействия.

В настоящее время, в области исследования трения и износа материалов, доминирует комплексность теоретико – экспериментальных подходов на основе объединения молекулярно-кинетической и структурно-энергетической составляющих с учетом фундаментального принципа, что разрушение при трении — это результат многоразового фрикционного взаимодействия сопрягаемых поверхностей.

Практическая реализация энергетических подходов для оценки трения и износа и в целом разрушения в процессе изнашивания ограничена трудностью количественного определения доли затраченной (внешней) энергии, ответственной за этот процесс. Обычно в подобных случаях проводится анализ энергетического баланса при трении и устанавливается его связь с конкретными физико-механическими процессами, происходящими на контакте.

Согласно первому закону термодинамики, применительно к процессам трения и изнашивания, работу сил трения ( $W_T$ ) можно представить соотношением, в виде суммы количества тепла, выделившегося при трении ( $Q$ ) и приращения внутренней энергии фрикционной системы ( $Q$ ). Сама внутренняя энергия также является суммой ее составляющих энергий, в частности, затраченных на - диспергирование (отделение) частиц износа; возможное структурно-фазовое превращение; пластическую деформацию; формоизменение контактирующих поверхностей. Учитывая, что в настоящее время отсутствуют точные аналитические формулы для оценки вышеизложенных составляющих, то с некоторым допущением и упрощением представим сумму изменения внутренней энергии трибосистемы, как результат пластического деформирования единичной микронеровности из за сдвига на средний диаметр пятна контакта; формоизменения режущего клина в результате отделения частиц износа с поверхности с формированием вновь образованных ювенильных поверхностей; использования современных инновационных смазочно – охлаждающих

жидкостей с возможностью последующей их активации.

В данной работе рассматриваются физико-химические процессы, происходящие в контактной зоне при резании, с использованием радикально-цепного механизма, предложенного профессором В.Н. Латышевым. Согласно этой теории, молекулы внешней среды в контактной зоне распадаются на активные атомы, радикалы и ионы, которые инициируют химические реакции, приводящие к образованию смазочных пленок на металлических поверхностях. Эти пленки пассивируют химическую активность металлов и уменьшают адгезионные взаимодействия.

Данная теория получила множество подтверждений и признана в научном сообществе. Процесс смазки при резании металлов имеет свои особенности и зависит от состояния металлических поверхностей резца и стружки, а также от свойств промежуточных частиц (атомов и радикалов), образующихся при разложении нейтральных молекул СОТС. Эти процессы активируются как ювенильной поверхностью, так и физическими методами активации.

Химическая активность ювенильных поверхностей определяется экзоэлектронной эмиссией и каталитическими свойствами металлов. Чем интенсивнее эмиссия электронов и выше их энергия, тем вероятнее взаимодействие с нейтральными молекулами СОТС, что приводит к более интенсивному распаду на атомы и радикалы. Кроме того, увеличение химических реакций при резании может быть достигнуто с помощью коронного разряда на СОТС (рис. 2.3).

Таким образом, при рассмотрении механизма действия кислородсодержащих полимерных СОТС следует иметь в виду, что в первом случае образование радикалов возможно в зоне резания (контакт молекул СОТС с ювенильной поверхностью), а во втором случае - радикалы создаются искусственно, еще до попадания СОТС в зону резания. Воздействие коронного разряда на СОТС с полимерными присадками приводит к деструкции последних с образованием новых соединений в контактной зоне.

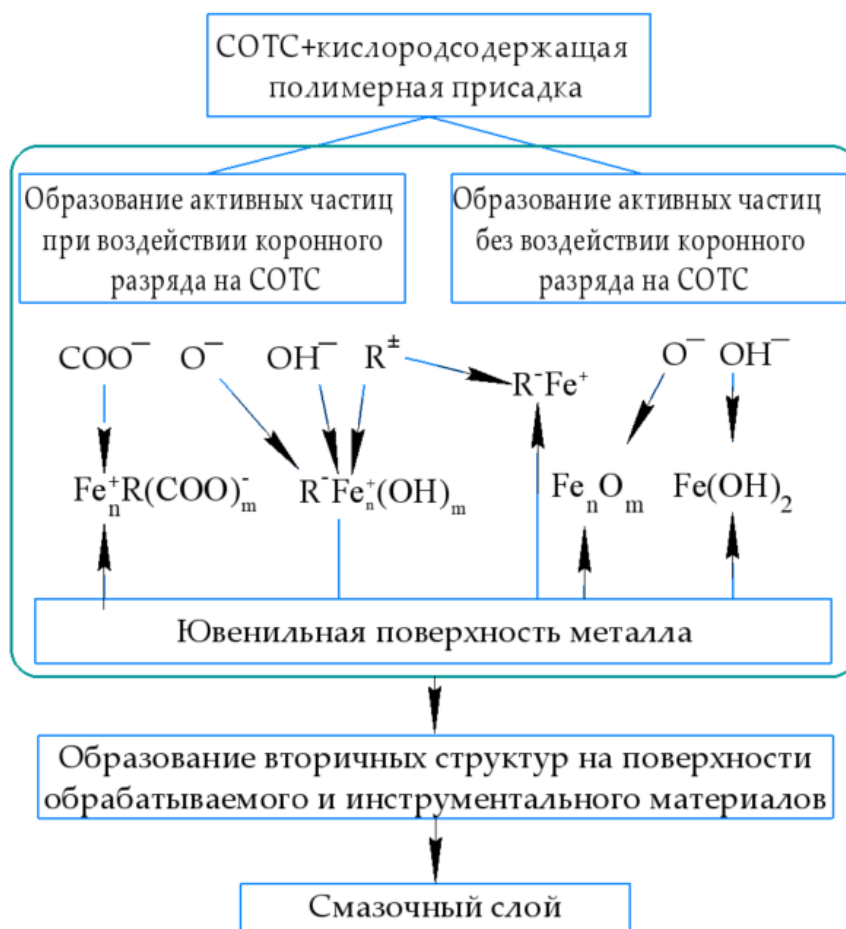


Рисунок 2.3 – Термоактивационная схема протекания радикально-цепных реакций при использовании кислородсодержащих полимерных присадок

Экспериментальным путем установлено, что окисление, полимерного соединения, содержащего значительное количество кислорода как поливиниловый спирт (ПВС) в водной среде, протекает по радикальному механизму [17]. Так, например, окисление кислородсодержащих полимерных присадок в водной среде протекает по свободно-радикальному цепному механизму с образованием промежуточных неустойчивых соединений и различных радикалов.

Согласно результатам проведенного исследования [54], энергетическое воздействие усиливает окислительные процессы и увеличивает реакционную способность среды, что способствует образованию неустойчивых соединений, таких как гидроксильная группа, карбоксильная группа и другие.

Кроме того, химически активные частицы полимеров, в результате химических реакций в контактной зоне, способны образовывать металлополимерные соединения, обладающие малым коэффициентом трения [16].

В работе [17] предлагается схема радикальных окислительных превращений ПВС в системе «ПВС+O<sub>3</sub> +O<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O», что в свою очередь может являться подтверждением высказанных ранее предположений.

Инициирование радикального механизма осуществляется по реакции отрыва молекулами озона атомов водорода от СН-связей поливинилового спирта, приводящих к образованию вторичных и третичных алкильных радикалов. Образовавшиеся на стадии инициирования гидроксильные радикалы весьма активны в реакциях отрыва атомов водорода от всех СН-связей поливинилового спирта [17]. Затем алкильные радикалы очень быстро присоединяют кислород, превращаясь в пероксильные радикалы.

Далее в работе [17] делается предположение, что вероятно деструкция поливинилового спирта происходит в результате распада радикалов, которые предварительно подвергается изомеризации.

Для пероксильного радикала (P<sub>(2)</sub>O<sup>•</sup><sub>(2)</sub>) термодинамически выгодным является превращение, приводящее к выделению гидропероксильного радикала.

Приведенная схема позволяет объяснить закономерности начальных стадий окислительных превращений поливинилового спирта.

Предположительно по такой схеме будут происходить превращения в контактной зоне при действии коронного разряда на используемое СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при обработке металлов резанием.

В результате проведенного анализа, для получения смазочных композиций, в качестве присадок, были отобраны — полиэтиленгликоль (ПЭГ) и поливиниловый спирт (ПВС). Выбранные вещества не имеют запаха и нетоксичны, а также относятся к классу водорастворимых полимеров, обладающих высоким содержанием кислорода (табл. 2.3).

Выбранные вещества обладают хорошей растворимостью в воде, что позволяет использовать данные соединения для получения поверхностно-активных веществ [97]. Структурные формулы используемых присадок представлены на рисунке 2.4.

Таблица 2.3 – Физико-химические свойства используемых полимеров [96]

Название полимера	Химическая формула	Молекулярная масса	Плотность г/см <sup>3</sup>	Температура деструкции, °С
Полиэтиленгликоль	HO-(-CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O-) <sub>n</sub> -OH	1000	1,12÷1,21	245
Поливинил-овый спирт	[-CH <sub>2</sub> CH(OH)-] <sub>n</sub>	8000	1,25	230

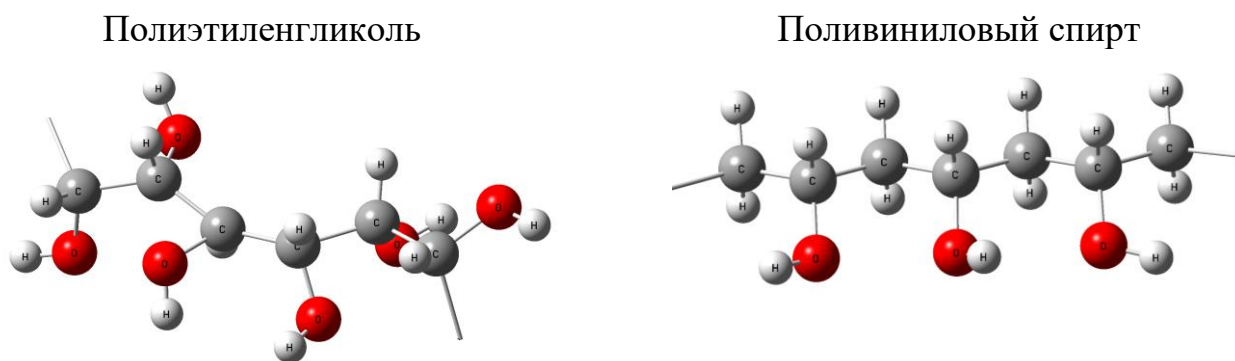


Рисунок 2.4 – Структурные формулы исследуемых присадок

В работе [32] рассматривается возможность применения органических соединений, в частности полимеров, таких как поливиниловый спирт, в качестве одного из компонентов СОТС для лезвийной и абразивной обработки металлов. Использование данных СОТС позволяет улучшить технологические показатели, такого процесса как нарезание резьбы в титановом сплаве [62].

В работе [89] исследованиями показано, что СОТС на основе водорастворимых полимеров - полиэтиленоксид, полиэтиленгликоль, по своему воздействию на стойкость инструмента показали удовлетворительные результаты, по сравнению с такими смазочными материалами как РЗ-СОЖ 8, Укринол-1.

Применение поливинилового спирта, в качестве присадки к СОТС, позволяет улучшить охлаждающие и антикоррозионные свойства [2].

Результаты работ, отмеченных выше, позволяют говорить об актуальности применения таких материалов как полимерные соединения, в качестве активных присадок к СОТС при обработке металлов резанием, в частности таких соединений как поливиниловый спирт, полиэтиленгликоль, содержащих значительное количество кислорода.

#### **2.4 Моделирование процессов образования соединений металлов с кислородсодержащими полимерными присадками**

Повышение эффективности обработки металлов резанием с использованием полимерных присадок объясняется образованием смазочных пленок на площадках резца и стружки, которые обладают различной структурой и свойствами (рис. 2.3). Эти смазочные пленки играют ключевую роль в снижении трения и износа, а также в улучшении теплоотведения в процессе резания, что повышает технологические параметры процесса резания.

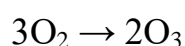
Учитывая состав применяемых полимеров, можно предположить, что пленки, образующиеся на поверхности режущего инструмента, будут иметь металлополимерную природу. Это означает, что молекулы полимеров могут взаимодействовать с металлическими поверхностями, образуя сложные структуры, которые способствуют улучшению смазочных свойств и повышению устойчивости к термическим и механическим воздействиям в зоне резания.

Для исследования возможности образования различных структур и механизмов протекания химических реакций воспользуемся теоретическими расчетными методами квантовой химии, а именно полуэмпирическим методом PM3 с помощью программы для проведения квантово-химических расчетов Hyperchem с RMS градиентом 0,5 ккал/моль. Метод PM3 применяется для расчета электронной структуры молекул, в особенности для моделирования органических молекул и координационных соединений. Этот метод зарекомендовал себя как эффективный инструмент для анализа структуры и свойств как неорганических,

так и органических соединений, позволяя получить качественные и количественные характеристики молекул и их взаимодействий на атомарном уровне [107].

В качестве объекта исследования был выбран элементарный фрагмент ПВС, который представляет собой один из распространенных полимеров, используемых в качестве присадок. Квантово-химические расчеты на основе выбранного фрагмента позволяют более глубоко понять механизмы взаимодействия полимеров с металлом, а также предсказать свойства образующихся смазочных пленок.

Для активации кислородсодержащих полимерных присадок используем энергетическое воздействие посредством коронного разряда. Коронный разряда представляет направленный поток заряженных частиц. При воздействии такого заряда возможно образование молекул озона из молекул кислорода по реакции:



Известно, что озон является веществом с высокой химической активностью и способен инициировать окисление поливинилового спирта (ПВС) по радикальному механизму [31]. Радикальные реакции, инициируемые озоном, представляют собой важный процесс, который может значительно изменить химическую структуру полимеров, включая ПВС, и привести к образованию новых функциональных групп и промежуточных продуктов.

В данной работе предполагается, что промежуточные продукты окисления поливинилового спирта могут образовывать металлополимерные комплексы с атомами железа (Fe), находящимися в дефектах кристаллических решеток инструмента и обрабатываемого материала. Это взаимодействие является ключевым для понимания механизма повышения эффективности обработки металлов резанием с использованием полимерных присадок. На рисунке 2.3 представлена схема образования таких соединений, иллюстрирующая возможные пути взаимодействия между окисленными продуктами ПВС и атомами Fe.

Под действием коронного разряда и озона происходит отрыв водорода от атома углерода углеродной цепи ПВС, что приводит к образованию вторичных и

третичных алкильных радикалов (рис. 2.5, 2.6) [31]. Эти радикалы обладают высокой реакционной способностью и могут вступать в дальнейшие реакции с другими молекулами, включая взаимодействие с атомами металлов, что приводит к образованию металлополимерных комплексов.

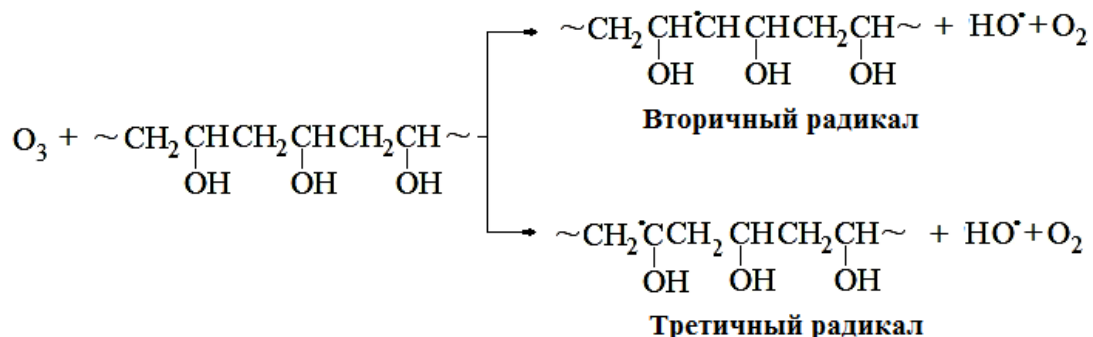


Рисунок 2.5 – Схема реакции образования вторичного и третичного алкильных радикалов ПВС при воздействии коронного разряда

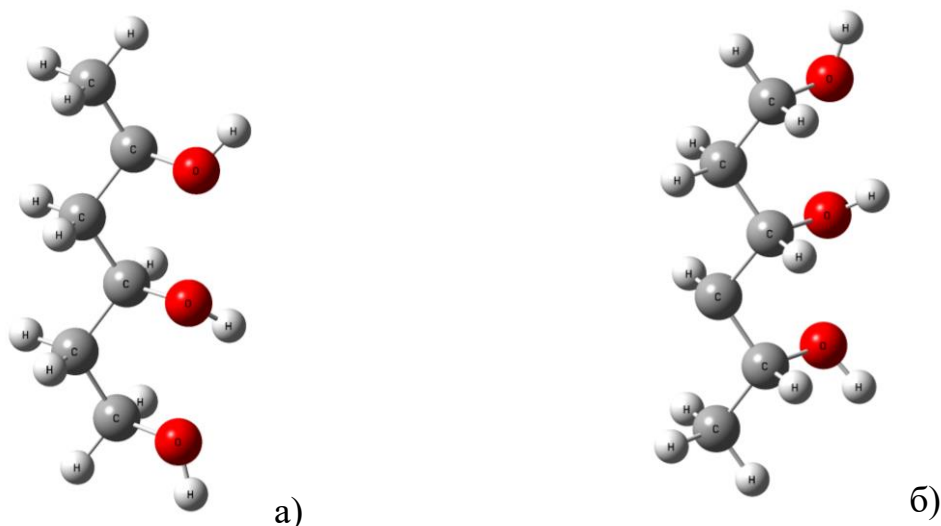


Рисунок 2.6 – Геометрическое строение вторичного и третичного алкильных радикалов ПВС

а) Третичный алкильный радикал ПВС; б) Вторичный алкильный радикал ПВС

Формирование таких комплексов может значительно изменить физико-химические свойства смазочных пленок, образующихся на поверхности инструмента, улучшая их адгезионные и смазочные характеристики. Кроме того, взаимодействие радикалов с атомами Fe может способствовать созданию новых активных центров на поверхности, что в свою очередь позволит снизить

температурной поле в зоне контакта, а также уменьшить износостойкость режущего инструмента.

Благодаря наличию свободных 3d-орбиталей, атом Fe способен принять неспаренный электрон от атома углерода углеродной цепи ПВС с образованием прочной ковалентной связи Fe-C (рис. 2.7).

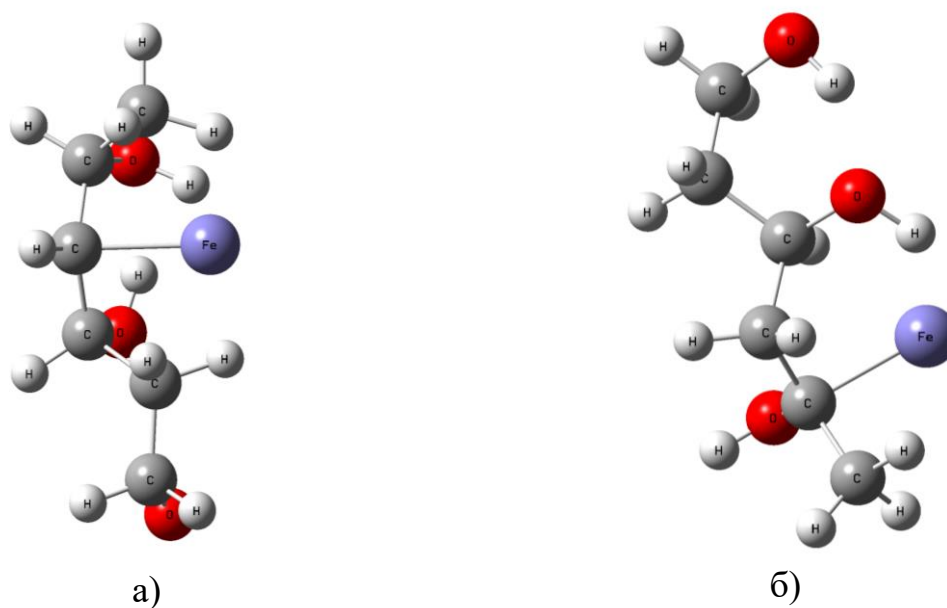


Рисунок 2.7 – Геометрическое строение комплекса состава:

а) 1 (Fe):1(вторичный радикал ПВС); б) 1 (Fe):1 (третичный радикал ПВС)

Затем к образовавшейся структуре возможно присоединение еще одного фрагмента ПВС (рис. 2.8, 2.9).

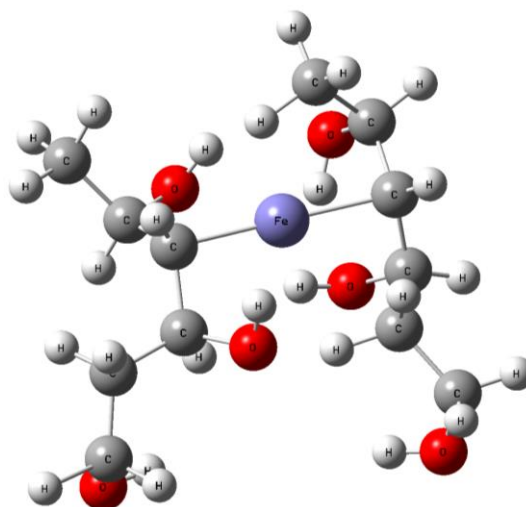


Рисунок 2.8 – Геометрическое строение комплекса состава

1 (Fe):2 (вторичный радикал ПВС)

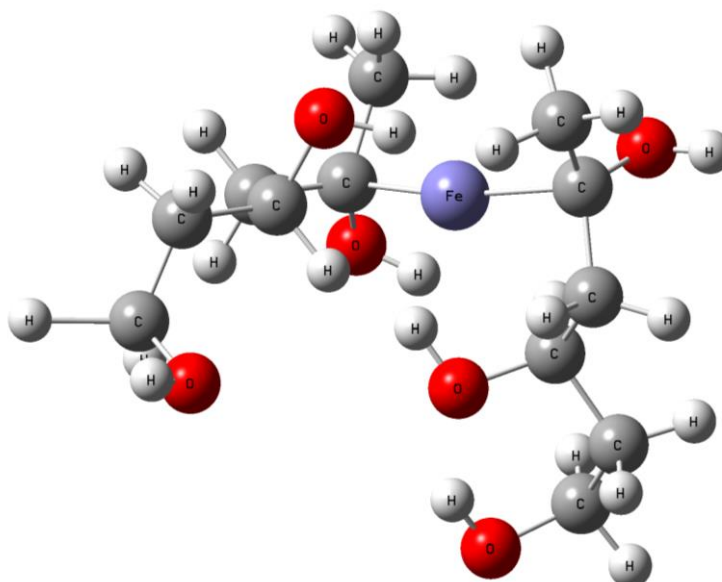


Рисунок 2.9 – Геометрическое строение комплекса состава  
1 (Fe):2 (третичный радикал ПВХ)

Таким образом, геометрическая оптимизация фрагмента структуры ПВХ, в рамках метода РМЗ, показывает возможность существования комплексов с атомами железа (рис. 2.10).

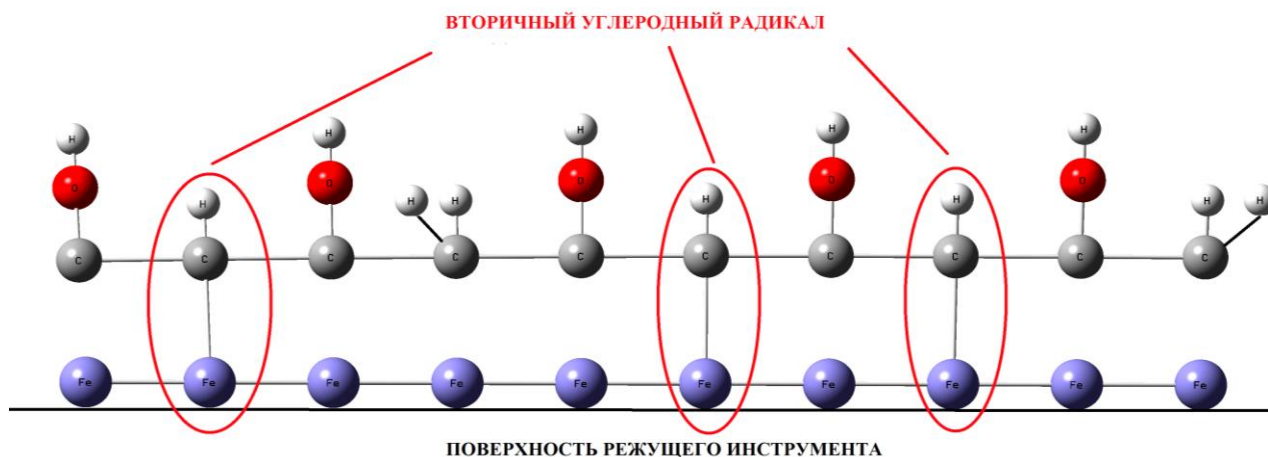
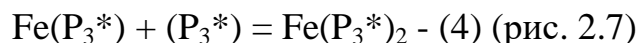
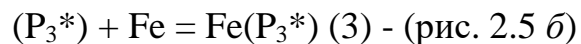
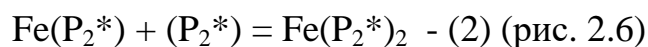
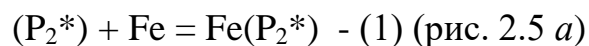


Рисунок 2.10 – Схема образования металлополимерных соединений в зоне трибосопряжения металлических поверхностей в присутствии активированного СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками

Термодинамическая возможность образования данных структур оценивалась исходя из энтальпий комплексообразования (1-4) в идеальной гипотетической газовой фазе, рассчитанных по следствию из закона Гесса на

основе РМЗ-энтальпий образования реагентов [107]. Результаты приведены в таблице 2.4.



где –  $(P_3^*)$  –  $CH_3-CH(OH)-CH^*-CH(OH)-CH_2-CH_2(OH)$  (вторичный алкильный радикал);

$(P_2^*)$  –  $CH_3-C^*(OH)-CH_2-CH(OH)-CH_2-CH_2(OH)$  (третичный алкильный радикал).

Таблица 2.4 – Энтальпии образования комплексов атомов железа с алкильными радикалами ПВС

Алкильный радикал	Энтальпия образования комплексов, кДж/моль	
	Состава 1(Fe):1(радикал ПВС)	Состава 1(Fe):2(радикал ПВС)
Вторичный	-401,1 (реакция 1)	-655,6 (реакция 2)
Третичный	-302,7 (реакция 3)	-762,8 (реакция 4)

Таблица 2.5 – Энтальпии реакций соединения радикалов ПВС

Алкильный радикал	Энтальпия реакций соединения, кДж/моль
Вторичный	437,5
Третичный	360,9

По данным таблицы 2.4, соединение 2 радикалов ПВС энергетически менее выгодно, поэтому образование комплексов Fe с радикалами ПВС более вероятно.

Анализ данных таблицы 2.4, 2.5 показывает возможность образования комплексов с атомами железа как одним, так и двумя радикалами ПВС. Однако заслуживает внимания анализ величин энергии образующихся связей.

Выигрыш в энергии при образовании комплексов можно связать с энергией связей в них. Так при образовании комплексов железа с одним радикалом ПВС - энергия процесса комплексообразования будет равна энергии связи, а при образовании комплексов железа с двумя радикалами ПВС энергия каждой из двух образующихся связей будет составлять  $1/2 \Delta H_{\text{комп}}$ .

Как следует из данных таблицы 2.4, более прочные связи атом железа образует в комплексах с одним вторичным радикалом ПВС или двумя третичными радикалами.

Поверхность инструмента и обрабатываемого материала является сложной структурой, состоящей из множества неровностей и микроскопических дефектов, которые создают благоприятные условия для взаимодействия между фрагментами радикалов полимеров и атомами железа. Эти неровности увеличивают площадь контакта и способствуют образованию комплексов при воздействии коронного разряда, который, в свою очередь, активизирует молекулы и способствует генерации радикалов. Таким образом, взаимодействие между фрагментами радикалов полимеров и атомами железа на неровностях поверхности может приводить к формированию новых химических соединений. Результатами такого взаимодействия наблюдается возникновение металлополимерных соединений, образующихся при механической обработке металлов резанием при использовании СОТС с выбранными присадками [56, 74].

Данный механизм также справедлив и для полиэтиленгликоля, в случае отрыва атома водорода от атомов углерода углеродной цепи ПЭГ с образованием соответствующих радикалов.

Также существует мнение о схожести механизма образования соединений Ti с ПВС при воздействии коронного разряда. Результаты, приведенные в таблице 2.6, показывают о возможности образования таких структур.

Проведенные расчеты показали, что при внешнем энергетическом воздействии возможно образование соединений различных металлов с органической полимерной присадкой к СОТС, например поливиниловый спирт.

Это подтверждают оптимизированные структуры, полученные методом РМЗ, и отрицательные значения тепловых эффектов реакций, рассчитанных по закону Гесса на основании энтальпий образования соответствующих реагентов в изолированном состоянии с использованием программного обеспечения HyperChem [74].

Данный метод позволяет использовать теоретические подходы к изучению физико-химических явлений при лезвийной обработке металлов.

Таблица 2.6 – Энтальпии образования комплексов атомов титана с алкильными радикалами ПВС

Алкильный радикал	Энтальпия образования комплексов, кДж/моль	
	1 частица ПВС	2 частицы ПВС
Третичный	-938,9 (реакция 5)	-1115,0 (реакция 6)
Вторичный	-990,4 (реакция 7)	-1212,1 (реакция 8)

Также, известно, что на поверхности титана присутствует оксидная пленка состава  $TiO_2$ , которая, в том числе, затрудняет обработку резанием данных материалов.

При обработке титанового сплава происходит разрушение  $TiO_2$ , находящегося на поверхности обрабатываемого материала. Учитывая, что температура в зоне контакта может достигать  $600\text{ }^{\circ}C$  и выше, то  $TiO_2$  может необратимо переходить в кристаллическую модификацию – рутил, имеющий более высокую твердость, по сравнению с другими кристаллическими модификациями  $TiO_2$  – анатаз и брукит [91, 108].

Согласно таблице 2.6, при обработке титановых сплавов возможно образование комплексов  $Ti$  с фрагментами кислородсодержащих присадок к СОТС, что в свою очередь позволит улучшить процесс механической обработки резанием титановых сплавов.

## Выводы по главе 2

1. По результатам теоретико – экспериментальных исследований радикально-цепных реакций и рассмотрения механизмов смазочного действия СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками предложена термоактивационная схема, описывающая последовательность их протекания и подтверждающая возможность повышения эффективности процесса резания

металлов за счет образования металлополимерных соединений при контактном взаимодействии.

2. На основе анализа физико-химических свойств полимеров определены две функциональные кислородсодержащие полимерные присадки для приготовления различных составов СОТС для механической обработки металлов резанием, обеспечивающие улучшение эксплуатационных свойств.

3. Исследованы возможности образования различных структур и механизмов протекания химических реакций с применением теоретических расчетных методов квантовой химии, результаты которых показали возможность образования таких соединений, как металлополимерные комплексы, в зоне контакта режущего инструмента и обрабатываемого металла, значительно улучшающие температурно – силовые условия и, следовательно, износостойкость режущего инструмента.

### **ГЛАВА 3. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ И АППАРАТУРА. ОБРАБАТЫВАЕМЫЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

#### **3.1 Используемые материалы и методы исследования**

Для изучения эффективности применения различных составов СОТС при лезвийной обработки резанием в качестве обрабатываемых материалов были отобраны из различных групп по обрабатываемости [24] с разными химическим составом и физико-механическими характеристиками и, как следствие, специфическими особенностями:

1. Из третьей группы по обрабатываемости: 12Х18Н10Т – нержавеющая хромоникелевая сталь аустенитного класса [24];
2. Из седьмой группы по обрабатываемости резанием: ВТ 5-1 и ВТ 6 – сплавы на титановой основе [24];
3. Из группы конструкционных углеродистых качественных сталей: сталь 45 [72].

При выборе обрабатываемых материалов учитывались следующие их особенности: широкая пригодность для производственного применения; массовость или широкое использование при обработке резанием; традиционность или избирательность при выборе из общего числа материалов. Использование стали 45 в качестве обрабатываемого материала, обусловлено широким распространением данного металла, а отсутствие легирующих элементов, в том числе, позволяет наиболее ярко наблюдать и описывать явления и процессы, происходящие в зоне резания при использовании различных СОТС, нежели в других металлах. (Состав материалов приведен в приложении Б).

В качестве режущего инструмента применялись резцы ВК6ОМ и Р6М5, сверла спиральные Р6М5К5.

Выбор инструмента из быстрорежущей стали обусловлен следующим:

1. Из представителей данной группы сталей изготавливается большой ассортимент осевых инструментальных материалов (сверла, фрезы, протяжки, резьбонарезной инструмент, фасонные резцы и др.). Так марка Р6М5К5 в этой группе является распространенной.

2. Также представленная сталь более чувствительна к адгезионными взаимодействиям с обрабатываемыми материалами. Довольно ярко проявляется химическое изнашивание по сравнению с другими инструментальными материалами.

Геометрия резцов является критически важным фактором, влияющим на эффективность процессов обработки металлов, таких как точение. Правильный выбор углов резца позволяет оптимизировать резание, снизить трение, уменьшить износ инструмента и улучшить качество обрабатываемой поверхности. В данной работе геометрия резцов была выбрана на основании анализа справочной литературы, что позволяет обеспечить целенаправленный подход к обработке различных материалов:

При точении нержавеющей стали:  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 12^\circ$ ,  $\gamma = 12^\circ$ ,  $\alpha = 6^\circ$ ,  $\alpha_1 = 6^\circ$ .

При точении титановых сплавов:  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 12^\circ$ ,  $\gamma = 5^\circ$ ,  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha_1 = 6^\circ$ .

При точении углеродистых сталей:  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\gamma = 20^\circ$ .

Инструменты из ВК6ОМ применяются согласно ГОСТ 3882-74 для чистовой и получистовой обработки твердых, легированных и отбеленных чугунов, закаленных сталей и некоторых марок нержавеющей высокопрочных и жаропрочных сталей и сплавов, особенно сплавов на основе титана, вольфрама и молибдена (точения, растачивания, развертывания, нарезания резьбы, шабровки).

### **3.2 Методы металлографического и металлофизического анализов**

Для изучения влияния СОТС на деформационные явления, проходящие в зоне резания, были получены корки стружки методом «падающего резца» (рис. 3.1). Параметры резания: сталь 45 – Р6М5; свободное резание,

$V = 45$  м/мин.,  $S = 0,1$  мм/об. Применялись различные составы СОТС. Образцы фотографировались при увеличении 300 раз.

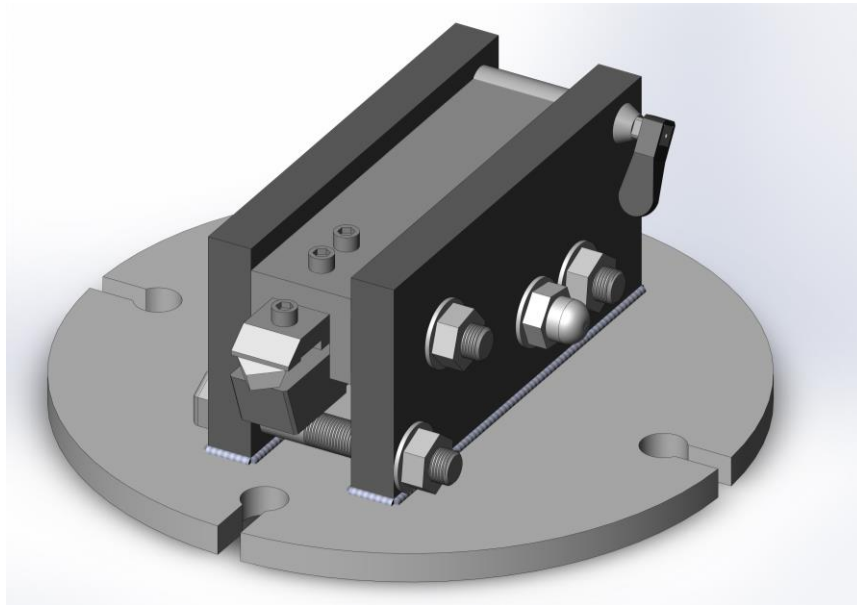


Рисунок 3.1 – Устройство для мгновенной остановки процесса резания

Размер деформированного слоя, после обработки металлов резанием, определяли, анализируя распределение твердости от поверхности вглубь материала с использованием микротвердомера ПМТ-3М (рис. 3.2, 3.3).



Рисунок 3.2 – Микротвердомер  
ПМТ-3М

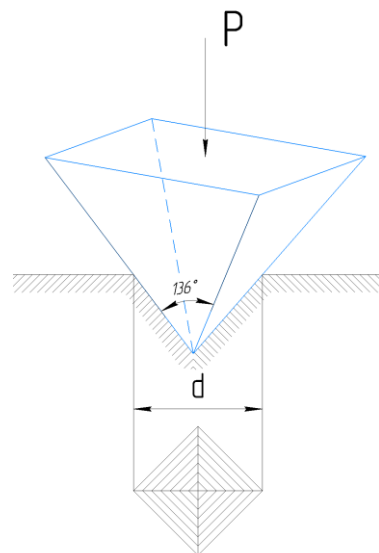


Рисунок 3.3 – Схема определения  
твердости по Виккерсу

Метод измерения микротвердости стандартизован (ГОСТ 9450—76). В качестве обрабатываемых материалов использовали: 12Х18Н10Т, ВТ5-1, сталь 45.

### 3.3 Метод измерения поверхностного натяжения и краевого угла

Для исследования поверхностного натяжения СОТС применялся метод сталагмометра (рис. 3.4).

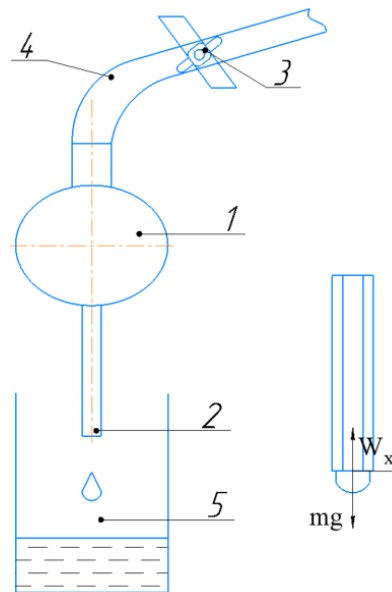


Рисунок 3.4 – Методика проведения исследования поверхностного натяжения СОТС

Этот метод основывается на том, что в момент отделения капли от нижнего конца вертикальной трубки вес капли ( $R$ ) уравнивается силой поверхностного натяжения ( $F$ ), действующей вдоль окружности шейки капли и предотвращающей её отрыв. В первом приближении можно считать, что

$$P = 2\pi \cdot r \cdot \gamma \quad (3.1)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения,  $r$  – радиус трубки.

Эта зависимость справедлива лишь в том случае, когда отрыв капли происходит по линии, равной внутреннему периметру капиллярной трубки.

Сталагмометр представляет собой стеклянную трубку 1 с расширением в центральной части и с капилляром 2 – в нижней. Капилляр служит для ограничения скорости образования капель, которая составляет 20 капель в минуту. При большей скорости вес капель изменяется, и не успевают устанавливаться равновесные значения концентрации вещества на поверхности. Для регулировки частоты падения капель используют резиновую трубку 4 с зажимом 3, надетую на верхнюю часть сталагмометра.

Для проведения измерений сталагмометр закрепляют в штативе. Через резиновую трубку в сталагмометр поступает исследуемый раствор вещества.

Затем подсчитывают количество капель (около 20), которые падают в предварительно высушенный и взвешенный бюкс.

На следующем этапе бюкс с жидкостью взвешивают, чтобы определить вес капли  $P$ . После проведения экспериментов с различными растворами вещества рассчитывают поверхностное натяжение  $\gamma$ .

Измерение краевого угла капли проводилось на установке, снабженной длиннофокусным микроскопом (рис. 3.5). На основании (1) закреплен столик для объекта (2) и жесткий штатив для микроскопа (3, 4). Головка микроскопа может вращаться, причем угол ее поворота может быть измерен с помощью градусной шкалы (5). Совмещение оси микроскопа с плоскостью основания капли производится грубо-перемещением держателя микроскопа вверх-вниз по штативу, и точно-вращением микрометрического винта (7) объектного столика.

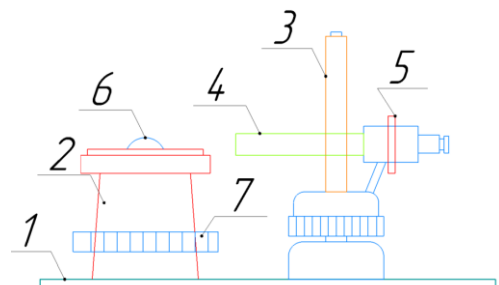


Рисунок 3.5 – Установка для измерения краевого угла

В качестве подложки для нанесения капли используют металлическую пластинку с гладкой поверхностью.

Для изучения изменения физико-химических свойств СОТС, при растворении экспериментальных присадок были исследованы поверхностные

явления, возникающие на границе раздела фаз (обрабатываемый металл-СОТС). В расчётах использовались уравнения Юнга и Дюпре.

Смачивание представляет собой критически важный физико-химический процесс, который оказывает существенное воздействие на ряд технологических процессов, включая механическую обработку металлов резанием. Этот феномен определяет взаимодействие между жидкой смазочно-охлаждающей средой и твердой поверхностью обрабатываемого материала, что, в свою очередь, влияет на эффективность процесса резания, (трение и износ инструмента), а также на качество обработанной поверхности.

В процессе обработки металлов резанием, степень смачивания поверхности инструмента и обрабатываемого материала играет ключевую роль в формировании адгезионных и когезионных сил, которые влияют на образования стружки и теплоотвод. Кроме того, смачивание оказывает влияние на коррозионные процессы. В контексте смачивания, краевой угол  $\theta$ , образующийся между поверхностями металла и жидкости в точке их соприкосновения, служит ключевым параметром, характеризующим степень смачивания.

При статическом смачивании краевой угол  $\theta$  определяется уравнением Юнга:

$$\cos\theta = (\gamma_{\text{ТВ}} - \gamma_{\text{ТВ.Ж}}) / \gamma_{\text{Ж}} \quad (3.2)$$

Значения краевого угла смачивания ( $\theta$ ) и поверхностного натяжения СОТС ( $\gamma_{\text{Ж}}$ ) являются необходимыми для расчета энергии смачивания или адгезионного напряжения:

$$W_{\text{э}} = \gamma_{\text{Ж}} \cdot \cos\theta \quad (3.3)$$

Адгезия жидкости к твердому телу описана уравнением Дюпре:

$$W_{\text{а}} = \gamma_{\text{ТВ}} + \gamma_{\text{Ж}} - \gamma_{\text{ТВ.Ж}} \quad (3.4)$$

где  $W_{\text{а}}$  – обратимая работа адгезии.

Уравнение Дюпре в сочетании с уравнением Юнга позволяет по известным значениям  $\cos\theta$  и  $\gamma_{\text{Ж}}$  определить работу адгезии - уравнение Дюпре-Юнга:

$$W_{\text{а}} = \gamma_{\text{Ж}} \cdot (1 + \cos\theta) \quad (3.5)$$

Чтобы оценить силу взаимодействия компонентов системы «жидкость — твердое тело» (СОТС) с металлической поверхностью, важно рассмотреть работу когезии  $W_k$ . Работа когезии представляет собой количество энергии, необходимое для разрыва тела и образования новой поверхности. Это ключевой параметр, который позволяет оценить прочность взаимодействия между жидкостью и твердой фазой [86]:

$$W_k = 2\gamma_{ж} \quad (3.6)$$

### 3.4 Метод контактного измерения шероховатости обработанной поверхности

Измерения проводились на профилографе-профилометре «Абрис ПМ7» рисунок 3.6.

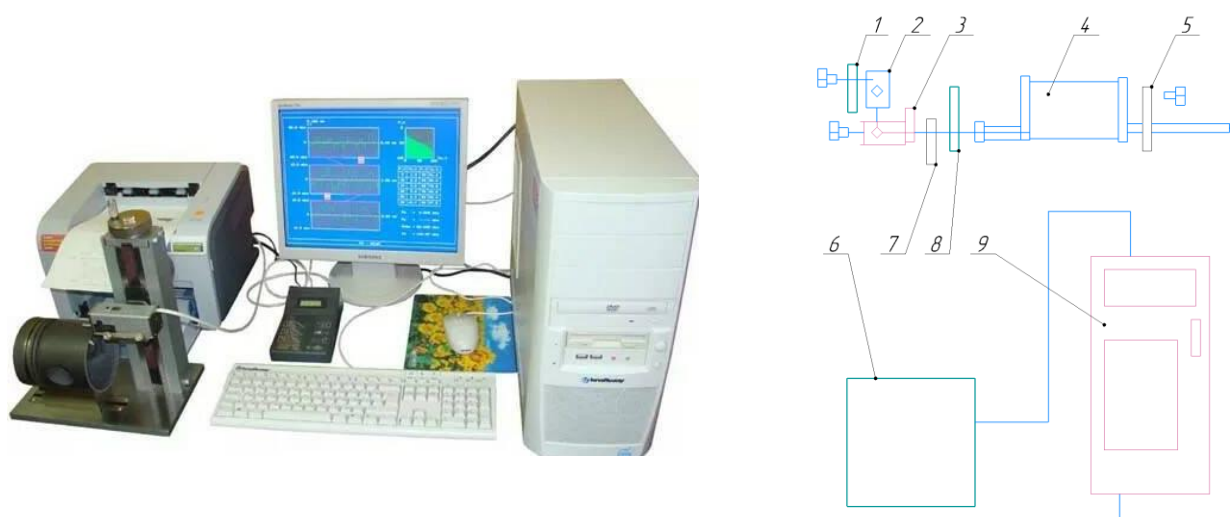


Рисунок 3.6 – Схема профилографа – профилометра «АБРИС – ПМТ7»

- 1 - опорная призма, 2 - промежуточная насадка, 3- насадка,  
 4 - первичный преобразователь, 5 - опорная призма, 6 – ПК,  
 7,8 - опорные призмы, 9 - отсчетное устройство

Шероховатость обработанной поверхности представляет собой одну из самых чувствительных характеристик, подверженных изменениям в условиях применяемой среды и влиянию смазочных свойств СОТС.

Влияние состава СОТС на шероховатость поверхности было предметом исследования в различных работах [10, 51]. Таким образом, важным критерием

для оценки факторов, влияющих на процесс резания, является шероховатость обработанной поверхности. Исследовалась шероховатость заготовок: 12Х18Н10Т, ВТ5-1, сталь 45, режущий инструмент Р6М5.

### 3.5 Метод определения остаточных напряжений в заготовках после лезвийной обработки

Остаточные напряжения в поверхностном слое заготовок, полученных в результате процесса точения, были оценены с применением метода резистивного электроконтактного неразрушающего контроля. Для этих целей использовался специализированный прибор «СИТОН-ТЕСТ», внешний вид которого иллюстрирован на рисунке 3.7. Данный метод позволяет получать количественные данные о распределении остаточных напряжений в поверхностном слое материала, что является критически важным для анализа механических свойств заготовок и их поведения в условиях эксплуатации.



Рисунок 3.7 – Прибор СИТОН-ТЕСТ, датчик и один из способов измерения

Представленный на рисунке 3.8 резистивный электроконтактный метод неразрушающего контроля остаточных напряжений основывается на глубокой корреляции между интегральными электрическими и механическими характеристиками металлов и сплавов. В частности, этот метод опирается на взаимосвязь между удельной электрической проводимостью ( $\rho$ ) в  $h$ -слое металла и деформирующей способностью, обусловленной остаточными напряжениями.

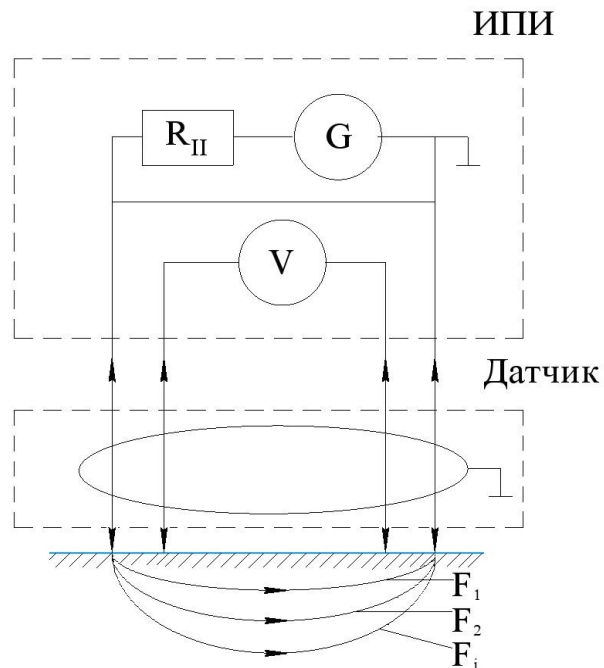


Рисунок 3.8 – Функциональная схема резистивный электроконтактного метода поверхностного слоя металла исследуемого изделия, где ИПИ – источник-приёмник-интерфейс;  $f_1, f_2, \dots, f_i$  – частоты засылаемого сигнала;  $G$  – генератор, формирующий задающий сигнал переменной частоты;  $V$  – вольтметр, определяющий сигнал-отклик электрического напряжения

Принцип работы данного прибора основан на явлении скин-эффекта, которое проявляется в том, что переменный электрический ток, проходя через проводник, распределяется неравномерно: с увеличением частоты тока, его плотность уменьшается по направлению к центру проводника. Это позволяет осуществлять послойное исследование образца металла, поскольку скин-эффект делает возможным анализ электрических свойств только верхних слоев материала.

В процессе работы прибора в образец вводится электромагнитное поле с различной амплитудой и частотой. Это поле вызывает изменения в распределении электрических токов в образце, что, в свою очередь, влияет на его электрические характеристики. После воздействия электромагнитного поля происходит

измерение сигнала-отклика, параметры которого непосредственно связаны с изменениями напряженного состояния образца.

Таким образом, анализ полученных данных позволяет не только определить уровень остаточных напряжений, но и оценить их распределение по объему материала, что представляет собой важный аспект для оценки прочности и долговечности конструкций, а также для выявления потенциальных дефектов и угроз безопасности в эксплуатации.

### 3.6 Прибор для энергетического воздействия на исследуемое СОТС

Энергетическое воздействие на экспериментальные смазочные материалы осуществлялась специально сконструированной установкой, посредством электрических разрядов. Для получения ионизированного воздуха применялся прибор - ионизатор-озонатор (рис. 3.9), данное устройство позволяет получать коронный разряд [67].



Рисунок 3.9 – Внешний вид ионизатора-озонатора

Ионизатор-озонатор состоит из блока питания для работы с сетевым напряжением 220 В и сопла с рабочим электродом. Данный прибор позволяет генерировать коронный разряд как с отрицательной, так и с положительной полярностью, без необходимости дополнительных нагнетательных систем. Устройство оснащено регулируемыми элементами для изменения напряжения коронирующего электрода от 0 до 17 кВ и давления ионизируемого потока от 0 до

$0,5 \cdot 10^5$  Па. Ток заряженных частиц ограничен 100 мкА. Смена полярности осуществляется простым разворотом умножителя напряжения, а для перехода на барьерный разряд необходимо заменить умножитель на кольцевидную ячейку.

Установка, представляющая собой интегрированное устройство (ионизатор-озонатор), функционирующее от бортового напряжения 36 В и обладающее гальванической развязкой, выполнена в едином корпусе. Это устройство включает в себя несколько ключевых компонентов, обеспечивающих его эффективность в технологических процессах.

В частности, оно оснащено соплом, которое представляет собой инжектор, предназначенный для микродозированной подачи различных СОТС в зону контакта между инструментом и обрабатываемым материалом.

Данная конструкция позволяет обеспечить оптимальное распределение смазочного материала, что способствует снижению трения и износа инструмента, а также улучшению шероховатости обработанной поверхности.

Кроме того, установка включает блок формирования высокого напряжения, который необходим для ионизации и генерации озона, что может дополнительно улучшать свойства СОТС. Для нагнетания воздуха к блоку получения СОТС и охлаждения компонентов электрической схемы блока формирования высокого напряжения предусмотрено использование регулируемого воздушного насоса. Этот насос может быть выполнен в различных конфигурациях, таких как мембранный, плунжерный, роторный или центробежный, что позволяет адаптировать установку под конкретные условия эксплуатации и требования производственного процесса.

### **3.7 Установки для износостойких испытаний СОТС при лезвийной обработке металлов**

Проведены серии экспериментов с установкой (ионизатор-озонатор) для исследования износостойкости режущего инструмента и других параметров

процесса резания. Схема подачи рабочей среды в зону резания на станке 1К62 (рис. 3.10, 3,11).



Рисунок 3.10 – Токарно-винторезный станок 1К62

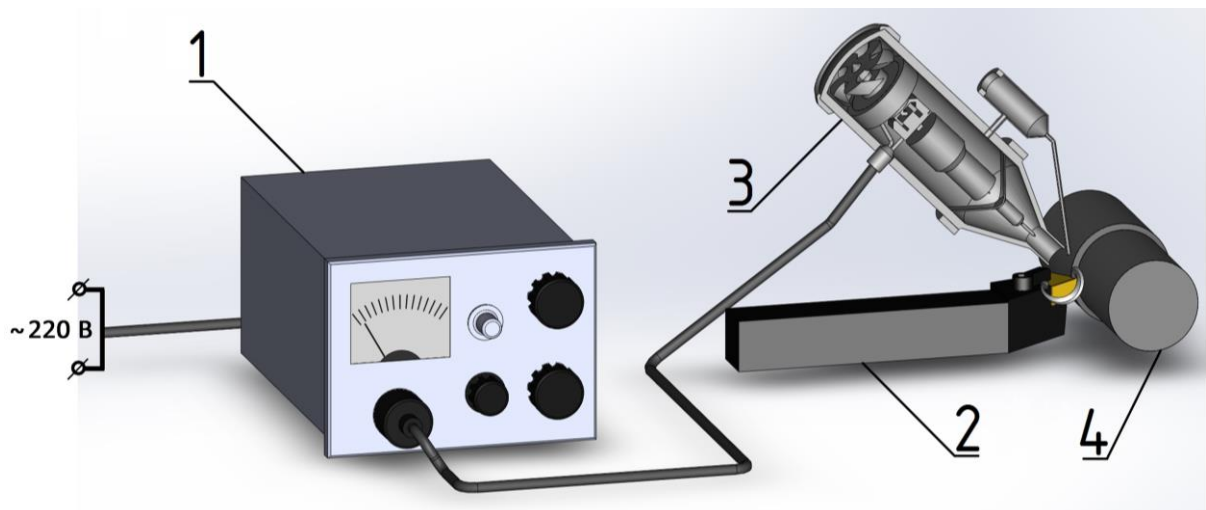


Рисунок 3.11 – Схема подачи ионизированного СО<sub>2</sub> в зону резания при точении: 1 – блок питания; 2 – режущий инструмент; 3 – ионизатор-озонатор; 4 - обрабатываемая заготовка

Устройство для изучения внешнего энергетического воздействия на СОТС при резании закреплено неподвижно относительно режущего инструмента и перемещается вместе с ним во время рабочих ходов.

Расстояние от торца сопла до зоны резания варьируется в пределах от 25 до 70 миллиметров и определяется в зависимости от конкретных условий обработки, таких как конструкция станка, его приспособления, форма обрабатываемой детали, вид сходящей стружки и другие факторы.

Для исследования влияния СОТС при сверлении были использованы - ионизатор со специально разработанной насадкой размещался на установке, как показано на рисунке 3.12, приставка для измерения крутящего момента [51] (рис. 3.13).

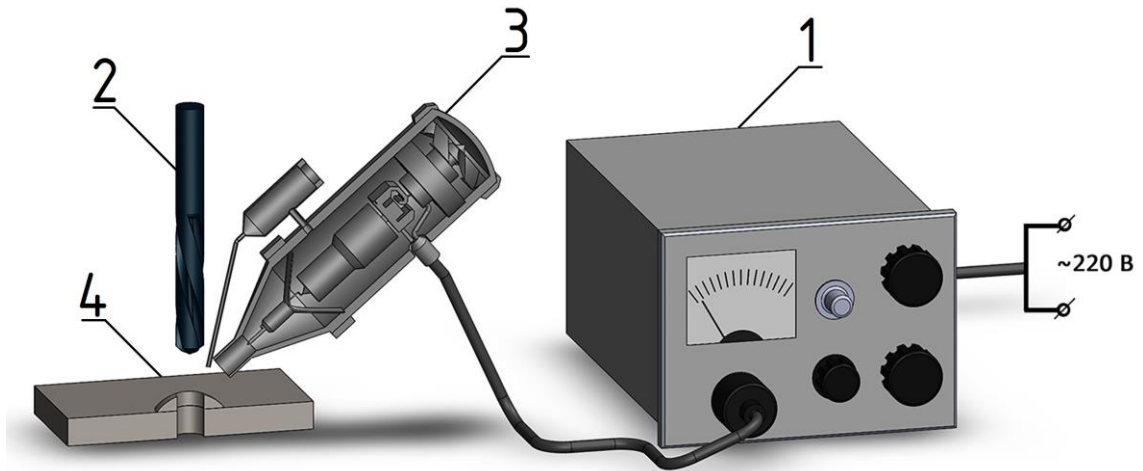


Рисунок 3.12 – Схема размещения ионизатора-озонатора при сверлении:

1 – блок питания; 2 – режущий инструмент; 3 – ионизатор-озонатор;  
4 - обрабатываемая заготовка

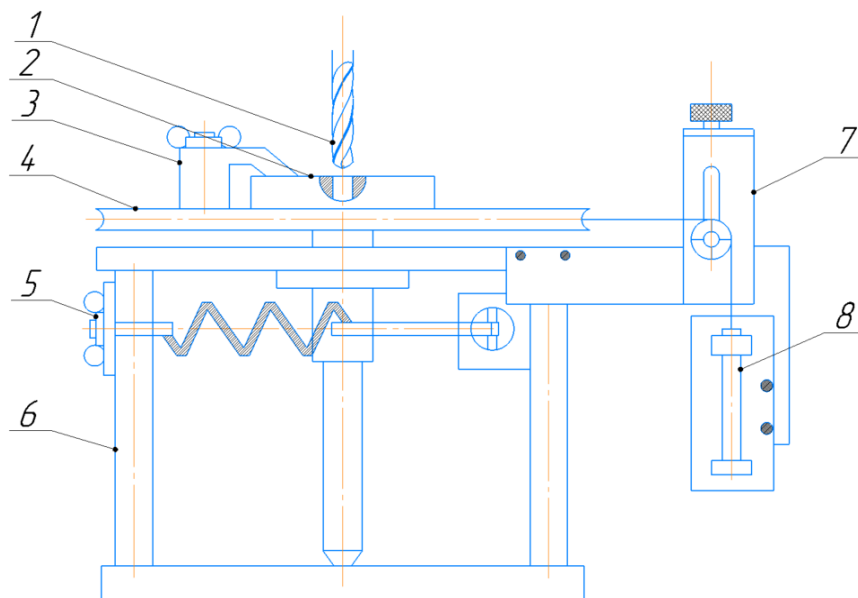


Рисунок 3.13 – Схема установки для исследования СОТС при сверлении:

1 – инструмент, 2 – заготовка, 3 – зажим заготовки, 4 – стол подвижный,  
5 – механизм компенсационный, 6 – стол неподвижный,  
7 – механизм регулирования датчика, 8 – датчик

Принцип действия приставки заключается в следующем: при врезании инструмента (1) в заготовку (2) поворачивается подвижный стол (4), закрепленный на валу, на одном конце которого находится конус. При действии силы между телами исследуемый образец вызывает вращение подвижного стола, который соединен с компенсационным механизмом (5), образуя в последнем момент. Как только момент компенсационного механизма уравнивает силу резания, поворотный столик останавливается. Сила резания оценивается по величине поворота столика.

Для измерения силы резания в установке был использован датчик линейных перемещений (ДЛП) (8), работающий на основе принципа дифференциального трансформатора. Этот тип датчиков находит широкое применение в различных областях, таких как мехатроника и автоматизация, благодаря своим характеристикам.

Особенностью работы датчика является то, что при малых смещениях  $\Delta N \sim \Delta x$ , а при значительных перемещениях из-за конечности размеров катушки возбуждения он выходит на насыщение. Согласно литературным данным, пропорциональность датчика сохраняется в случае, если величина смещения не превышает 10 % от длины катушки возбуждения. Разработанный ДЛП был интегрирован в систему приставки. Поворотный столик через механизм регулирования датчика (7) соединяется с сердечником возбуждения катушки. При повороте столика катушка возбуждения перемещается относительно измерительных катушек. В результате этого, на выходе ДЛП появляется изменяющийся сигнал, который, проходя через АЦП (аналого-цифровой преобразователь), фиксируется на компьютере при помощи виртуального измерительного прибора (ВИП).

Для исследования смазочной способности активированных экспериментальных СОТС при сверлении были выбраны следующие материалы - титановые сплавы ВТ5-1 и ВТ6, а также стали 12Х18Н10Т и 45.

Образцы были изготовлены в форме диска, что позволяло обеспечить возможность многократного проведения экспериментов. Схема крепления

образца приведена на рисунке 3.12. Используемые образцы имели следующие размеры: диаметр 80 мм, толщина 10 мм.

### **3.8 Метод изучения вторичных структур с помощью электронной микроскопии**

Исследование соединений и структур, сформированных на границе раздела в процессе резания с использованием полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств, осуществлялось с применением метода электронной микроскопии.

Для получения электронограмм и снимков поверхностей использовался электронный микроскоп «GEOL», оснащённый режимом микродифракции и функционирующий при ускоряющем напряжении в 50 киловольт (рис. 3.14).

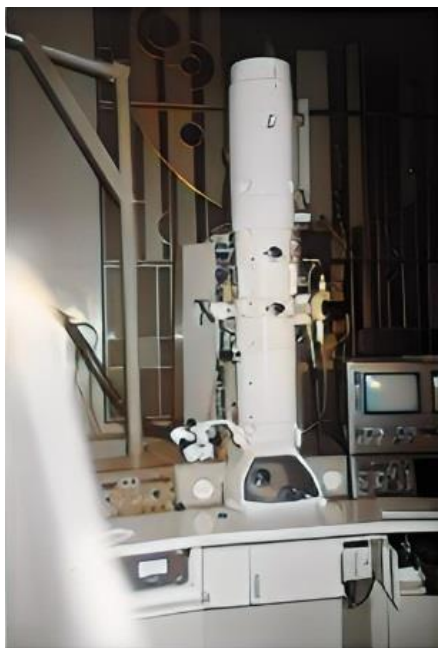
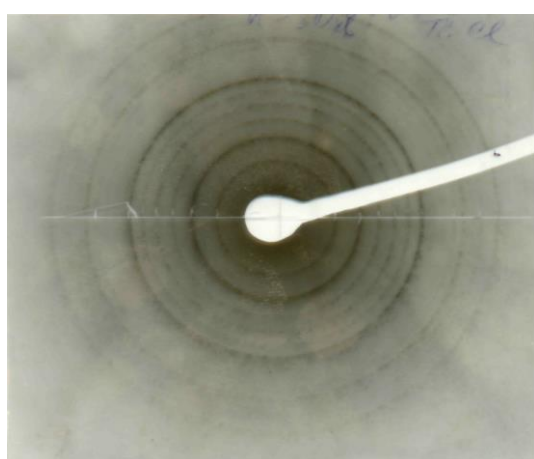


Рисунок 3.14 – Просвечивающий электронный микроскоп «GEOL»

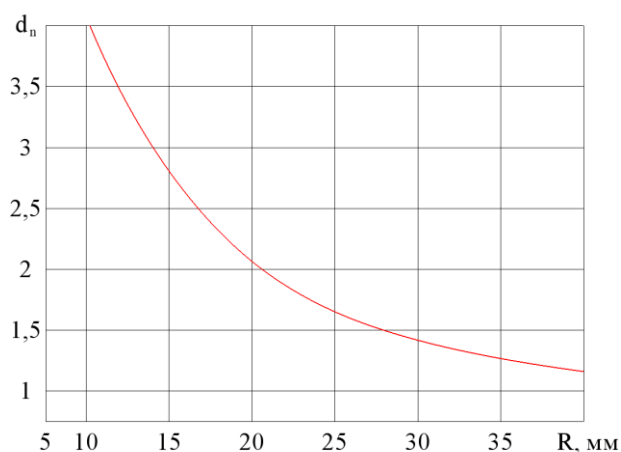
В процессе расчета картин электронной дифракции постоянная микроскопа  $S$  определяется как коэффициент, который устанавливает связь между расстояниями, измеряемыми на электронограмме, и фактическими межплоскостными расстояниями  $d_T$  в кристаллической решетке. В данном

исследовании в качестве эталона был выбран кристалл тетрахлорида таллия (TlCl), поскольку он обладает заранее известными межплоскостными расстояниями, что позволяет обеспечить высокую точность измерений.

Картина дифракции данного кристалла, а также график зависимости межплоскостных расстояний от радиусов колец дифракции представлены на рисунках 3.15 (а) и (б) соответственно.



а)



б)

Рисунок 3.15 – Электроннограмма TlCl (эталон) (а) и зависимость межплоскостных расстояний  $d_n$  от радиусов дифракционных колец (б)

Эти данные позволяют провести сравнительный анализ и верификацию полученных результатов, что является важным этапом в изучении свойств кристаллических материалов и их взаимодействия с электронным лучом.

### 3.9 Планирование экспериментов и математическая обработка результатов опытов

#### 3.9.1 Обработка результатов эксперимента и нахождение оптимальных параметров эффективного применения СОТС

Обработка результатов, полученных после лезвийной обработки металлов с применением экспериментальных СОТС на работоспособность режущих

инструментов, проводилась с использованием математического планирования эксперимента [5, 88]. В качестве изменяемых параметров взяты - концентрация полимерных присадок в СОТС и величина напряжения на коронирующем электроде. За выходной параметр (параметр оптимизации) принимался период стойкости быстрорежущего инструмента при точении.

Период стойкости резцов является главным фактором, определяющим эффективность действия СОТС. Для проведения исследований использовались заготовка из стали 45 и резец проходной упорный Р6М5.

Режимы резания выбирались согласно рекомендациям ( $V = 60$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм) [72]. Величину износа измеряли через равные промежутки времени по задней поверхности резца с помощью микроскопа МПБ-2. Изучение динамики износа режущего инструмента проводилось до начала катастрофического износа инструмента (фаска в  $0,7$  мм по задней поверхности резца (рис. 3.16)).

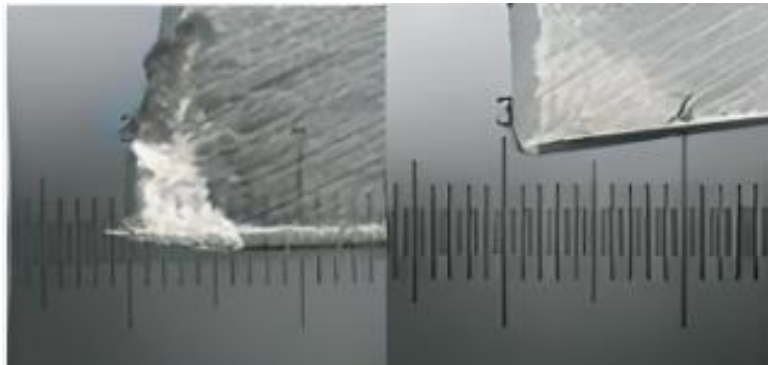


Рисунок 3.16 – Фаска износа на задней поверхности резца  
Цена деления  $0,05$  мм. (увел.  $24\times$ )

Подача СОТС осуществлялась в направлении передней поверхности инструмента (рис 3.11). При проведении экспериментов подача СОТС составляла  $8-10$  мл/мин.

Для поиска оптимальных условий применения активированных СОТС с полимерными присадками выберем следующую модель [5]:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (3.7)$$

где  $b_0, b_1, b_2, b_{12}, b_{11}, b_{22}$ , - коэффициент регрессии.

Значения (уровни) факторов удобно задавать в относительных или кодированных величинах. Верхний уровень фактора равен +1, нижний -1, средний или основной 0. В общем случае, кодированное значение фактора определяется по формуле [5]:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \Delta\tilde{x}_{i0}}{I} \quad (3.8)$$

где  $i$  — номер рассматриваемого фактора;  $x_i$  +1 или -1 кодированное значение факторов;  $\tilde{x}_i$  — натуральное значение  $i$ -го фактора;  $I$  — интервал варьирования  $i$ -го фактора в натуральном выражении;  $\Delta\tilde{x}_{i0}$  — натуральное значение основного уровня  $i$ -го фактора.

По результатам измерений определим среднее значение параметра оптимизации  $\bar{y}$  по формуле [5]:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (3.9)$$

где  $n$  — число параллельных опытов в каждой строке матрицы планирования;  $y_i$  — значение параметра оптимизации в  $i$ -ом параллельном опыте.

Уравнение регрессии запишем в следующем виде

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 \quad (3.10)$$

где  $x_1, x_2$  — кодированные значения факторов;

$b_1, b_2, b_3$  — коэффициенты, показывающие степень влияния каждого фактора на параметр оптимизации;

$b_{12}$  — коэффициент, показывающий степень влияния взаимодействия соответствующих факторов на параметр оптимизации.

Для построения математической модели процесса коэффициенты регрессии определяли по формулам [5]:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{ji}}{N} \quad b_{uj} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i x_{uj} x_{ji}}{N} \quad (3.11)$$

Для оценки отклонения значений параметра оптимизации от среднего значения вычисляли дисперсию воспроизводимости по данным трех параллельных опытов в каждой точке плана по формуле [5]:

$$s^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \quad (3.12)$$

где  $y_i$ - значение в каждом опыте,  $\bar{y}$  - среднее значение из  $n$  повторных опытов.

Далее проведем проверку однородности дисперсий. Если сравниваемое количество дисперсий больше двух, и одно значительно превышает остальные, можно воспользоваться критерием Кохрена. Этот критерий пригоден для случаев, когда во всех точках имеется одинаковое число повторных опытов. При этом, подсчитывается дисперсия в каждой горизонтальной строке матрицы, а затем из всех дисперсий находится наибольшая  $s_{\max}^2$ , которая делится на сумму всех дисперсий [5].

$$G = \frac{s_{\max}^2}{\sum_1^N s_i^2} \quad (3.13)$$

С этим критерием связаны числа свободы  $f_1 = n - 1$  и  $f_2 = N$ , где  $n$  – число повторных опытов,  $N$  – число суммируемых дисперсий. Гипотеза об однородности дисперсий подтверждается, если экспериментальное значение критерия Кохрена не превышает табличного значения. Тогда можно усреднять дисперсии и пользоваться формулой [5]:

$$s^2 \{y\} = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{N(n-1)} \quad (3.14)$$

Далее проведем оценку адекватности полученной модели. Для проверки гипотезы об адекватности можно использовать F-критерий (критерий Фишера):

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s^2\{y\}}, \quad (3.15)$$

где  $s_{ad}^2$  - дисперсия адекватности,  $s^2\{y\}$  - дисперсия воспроизводимости.

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta y_i^2}{f} \quad (3.16)$$

где  $f$  – число степеней свободы (определяется, как число различных опытов, результаты которых используются при подсчете коэффициентов регрессии, минус число определяемых коэффициентов),  $\Delta y_i^2$  - остаточная сумма квадратов.

При выполнении условия  $F_{эксн} < F_{табл.}$  модель с доверительной вероятностью (0,05) можно считать адекватной.

Значимость коэффициентов регрессии проверялась по t-критерию Стьюдента. Прежде всего, надо найти дисперсию коэффициента регрессии  $s^2\{b_j\}$ . В нашем случае, она определяется по формуле [5]:

$$s\{b_j\} = \frac{s\{y\}}{\sqrt{N}} \quad (3.17)$$

$s\{y\}$  - дисперсия воспроизводимости,  $N$  – число дисперсий.

Критическое значение t-критерия определяется по таблице, для числа степеней свободы  $f=n-2$ , при уровне значимости  $p=0,05$ . Доверительный интервал определяется [5]:

$$\Delta b_j = \pm t_i s\{b_j\} \quad (3.18)$$

Значимость коэффициентов регрессии оценивалась сравнением модулей значений коэффициентов и доверительного интервала. Если расчетное значение  $t_i$  было больше табличного ( $t_i > t_{кр}$ ), то гипотезу значимости коэффициента принимали, в противном случае, коэффициент считали статистически

незначимым и отбрасывали его без пересчета остальных коэффициентов. В математическую модель включали только значимые коэффициенты.

### 3.9.2 Исследование влияние основных факторов процесса резания на период стойкости режущего инструмента

С целью установления математической зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи при использовании активированного экспериментального СОТС в процессе точения, был проведен полный факторный эксперимент  $2^2$ .

Зависимость стойкости режущего инструмента от элементов режима резания выразим следующим уравнением:

$$T = CV^x S^y \quad (3.19)$$

где  $T$ - показатель стойкости,  $C$ - постоянный коэффициент,  $V$ -скорость резания в м/мин,  $S$ -подача в мм/об.

Уравнение (3.20) в результате логарифмирования линейризуется

$$\ln T = \ln C + x \ln V + y \ln S \quad (3.20)$$

Уравнение (3.21) можно выразить следующим образом:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 \quad (3.21)$$

где  $\hat{y} = \ln T$ ;  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$ , - кодированные значения  $V, S$ .

Преобразование независимых переменных  $\tilde{x}_i$  производится с помощью уравнения преобразования [88], где за единицу нового масштаба принято

выражение  $\frac{1}{2} (\ln \tilde{x}_{i \max} - \ln \tilde{x}_{i \min})$

$$x_i = \frac{2(\ln \tilde{x}_i - \ln \tilde{x}_{i \max})}{(\ln \tilde{x}_{i \max} - \ln \tilde{x}_{i \min})} + 1 \quad (3.22)$$

### 3.10 Синхронный термический анализ

Исследование термической деструкции полимерных присадок проводили на термическом анализаторе Setsys Evolution 18 в атмосфере азота (ОСЧ ГОСТ 9293-74) методом синхронного термического анализа (рис. 3.17, 3.18). Расход азота во время эксперимента составлял 50 мкл/мин. Для имитации воздушной среды в камеру анализатора вводили кислород (технический по ГОСТ 5583-78) в количестве 13 мкл/мин (для получения содержания кислорода в системе равной 21%, как для воздуха). Для регистрации тепловых эффектов использовался датчик S-типа (Pt/PtRh (10 %)). Масса навески изучаемого полимера составляла 10-11 мг.

Исследование термической деструкции компонентов СОТС, происходящих в зоне контакта режущего инструмента и обрабатываемого материала, осуществлялось в азотно-кислородной (21 %) смеси с добавлением образца обрабатываемого металла (сталь 45) и режущего инструмента (Р6М5).

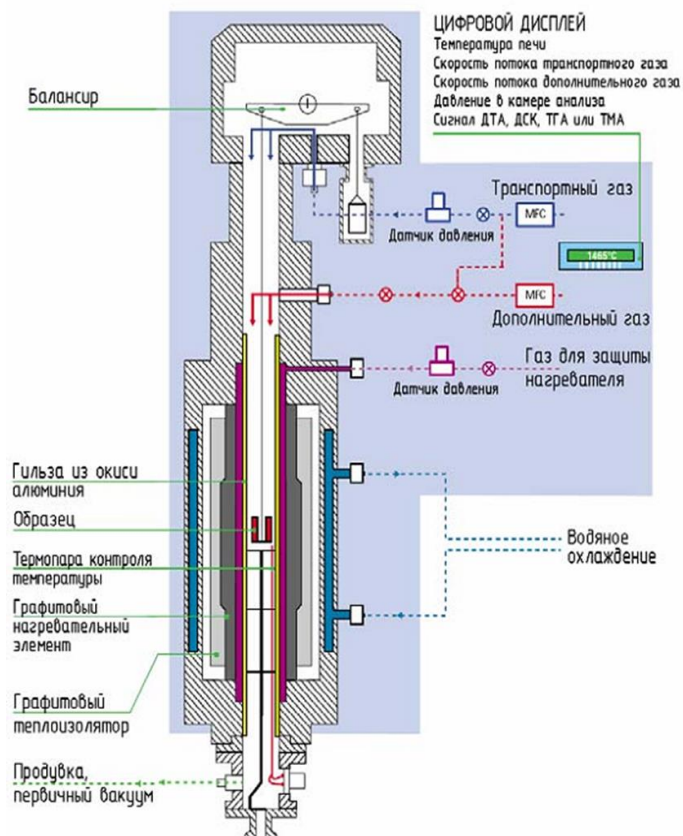


Рисунок 3.17 – Схема работы камеры термического анализатора и весового блока



Рисунок 3.18– Общий вид термического анализатора Setaram Setsys Evolution 18

Нагревание образцов проводили до 800 °С в тиглях из корунда ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (рис. 3.19) по графику, изображенному на рисунке 3.20. Скорость нагрева составляла 5 К/мин.

Достоверность полученных экспериментальных данных подтверждалась тремя сходящимися параллельными испытаниями для каждого образца.



Рисунок 3.19 – ДСК-датчик (Pt/PtRh) с тиглями из  $\text{Al}_2\text{O}_3$

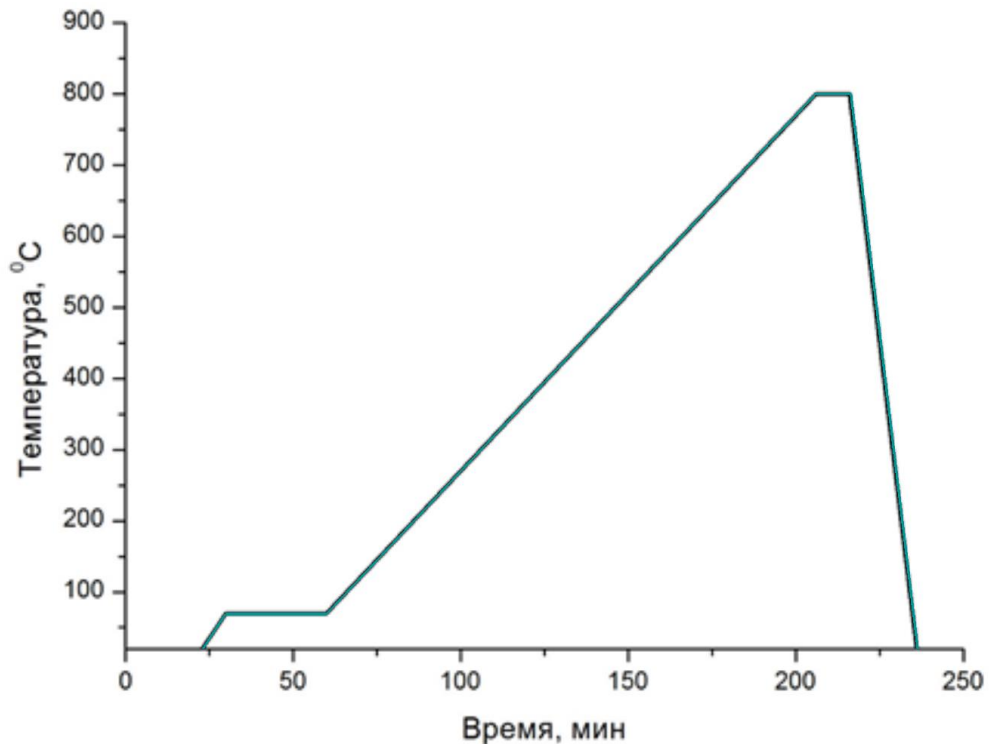


Рисунок 3.20 – График нагрева во время эксперимента

### Выводы по главе 3

1. Обоснованы и выбраны инструментальные и обрабатываемые (различных групп обрабатываемости) материалы для проведения экспериментальных исследований влияния разработанных СОТС на основные показатели повышения эффективности процесса лезвийной обработки резанием.

2. Разработаны методики и подобрано оборудование для экспериментальных исследований влияния состава СОТС на износостойкость режущего инструмента, температурно - силовые условия резания и показатели качества обработанной поверхности.

3. Изучена и предложена методика обработки экспериментальных данных с использованием полного факторного эксперимента, позволяющая определить оптимальные параметры режима работы ионизатора-озонатора для определенных концентраций полимерных присадок в СОТС.

## ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА СОТС АКТИВИРОВАННОГО КОРОННЫМ РАЗРЯДОМ НА ЛЕЗВИЙНУЮ ОБРАБОТКУ МЕТАЛЛОВ РЕЗАНИЕМ

### 4.1 Экспериментальное исследование поверхностной активности кислородсодержащих полимерных присадок при выборе базового СОТС

Для выбора предпочтительного базового СОТС, в котором растворялись полимерные присадки, были проведены предварительные испытания. В качестве сравнительных СОТС были взяты, выпускаемые Ивановским предприятием ОАО «Ивхимпром», «Эмульсол Т» (композиция, на основе минерального масла и соли высокомолекулярной органической кислоты, рекомендуемая концентрация рабочего раствора эмульсии (%)) при лезвийной и абразивной обработке стали 5,0 – 10,0) (далее СОТС 4) и «Эфтол» (композиция, на основе гликоля, органических ПАВ с антифрикционными присадками и ингибиторами коррозии, рекомендуемая концентрация рабочего раствора (%)) при лезвийной обработке 5,0) (далее СОТС 1), которые широко применяются на производстве.

В рамках исследования изучалось влияние полимерных добавок на поверхностные свойства жидкостей. Для анализа поверхностной активности растворённых веществ использовали метод построения изотерм поверхностного натяжения. Он позволяет оценить уровень поверхностной активности и определить критическую концентрацию мицеллообразования (ККМ). Полученные зависимости позволяют установить рабочие концентрации присадок в смазочных жидкостях. Значение поверхностного натяжения  $\gamma$  определяли по формуле 3.1.

Были получены концентрационные зависимости поверхностного натяжения растворённых полимеров в воде (рис. 4.1, 4.2). Кривые зависимости поверхностного натяжения  $\gamma$  от концентрации полимерных добавок имеют классический вид, который характеризуется двумя основными участками.

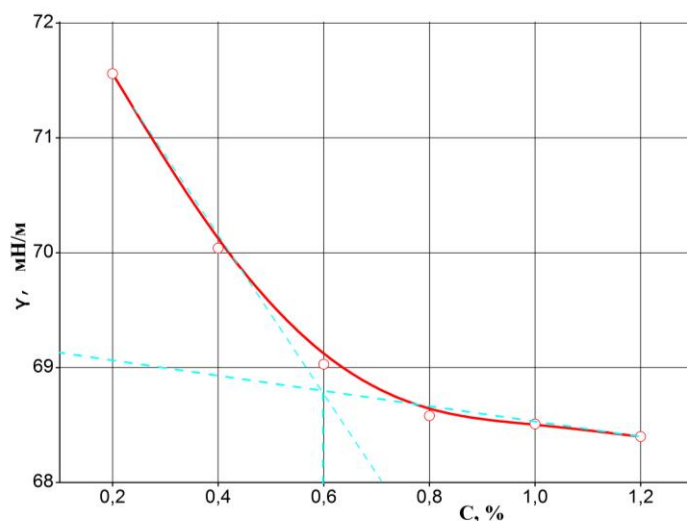


Рисунок 4.1 – Зависимость поверхностного натяжения СOTS от концентрации присадки ПВС

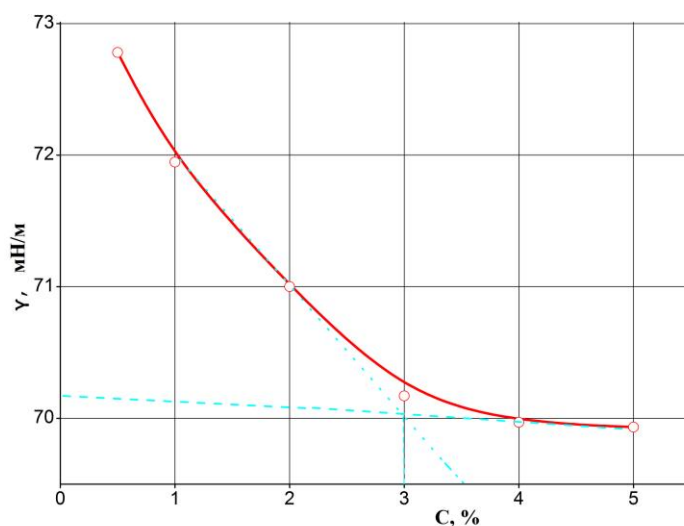


Рисунок 4.2 – Зависимость поверхностного натяжения СOTS от концентрации присадки ПЭГ

В области малых концентраций наблюдается значительное снижение значения  $\gamma$  при увеличении концентрации добавок. Этот участок кривой указывает на высокую поверхностную активность полимеров, что связано с их способностью адсорбироваться на поверхности жидкости и снижать поверхностное натяжение. При достижении критической концентрации мицеллообразования (ККМ) происходит резкое изменение в представленной зависимости. В этой точке начинается образование мицелл, и, как следствие,

дальнейшее снижение поверхностного натяжения становится затруднительным. Это связано с тем, что молекулы полимеров, находясь в растворе, начинают агрегироваться, что препятствует их эффективной адсорбции на границе раздела фаз и снижению  $\gamma$ .

По результатам проведенных исследований, были установлены оптимальные концентрации растворённых полимеров, обеспечивающие максимальный смазочный эффект. Для поливинилового спирта (ПВС) оптимальная концентрация в растворе составляет 0,6 % по массе, что позволяет достичь значительного снижения поверхностного натяжения и, соответственно, улучшения смазывающих свойств. Для полиэтиленгликоля (ПЭГ) оптимальная концентрация составляет 3 % по массе, что также способствует максимизации смазочных характеристик, за счёт оптимального баланса между адсорбцией на поверхности и образованием мицелл в объёме раствора.

Поверхностное натяжение  $\gamma$  является одним из фундаментальных параметров, оказывающих значительное влияние на диспергируемость системы. Уменьшение значения  $\gamma$  приводит к образованию более мелких капель смазочного материала при фиксированных условиях перемешивания, что, в свою очередь, способствует повышению стабильности данной системы [4].

Чтобы понять явление поверхностного натяжения жидкости, необходимо рассмотреть краевой угол смачивания  $\theta$ . Этот угол образуется между касательной к капле жидкости и поверхностью. Если угол меньше 90 градусов, то жидкость растекается по поверхности, а если больше — не смачивает подложку.

Исследованы поверхностные свойства на границе между обрабатываемым металлом и СОТС. Результаты расчётов представлены в таблице 4.1.

Данные показывают, что экспериментальные присадки снижают поверхностное натяжение и повышают смачиваемость поверхности. Так коэффициент  $\gamma$  для СОТС 4 равен  $44 \cdot 10^{-3}$  Н/м, а для СОТС 1 -  $41,21 \cdot 10^{-3}$  Н/м. Наилучшие показания коэффициента поверхностного натяжения имеет СОТС 1 с присадками полимеров.

Таблица 4.1 – Поверхностные свойства СОТС с новыми присадками

Наименование СОТС	Физико-химические свойства исследуемых СОТС				
	$\gamma$ , ( $10^{-3}$ Н/м)	$\theta$ ,град; (cos $\theta$ )	$W_3$ ( $10^{-3}$ Н/м)	$W_a$ ( $10^{-3}$ Н/м)	$W_k$ ( $10^{-3}$ Н/м)
СОТС 4	44,92	26; 0,899	40,37	85,21	89,84
СОТС 6	43,21	20; 0,94	40,6	83,84	86,42
СОТС 5	40,1	17; 0,956	38,29	78,31	80,1
СОТС 1	41,31	28,6; 0,878	36,2	77,39	82,42
СОТС 3	38,97	23,4; 0,92	35,85	74,7	77,94
СОТС 2	34,85	19; 0,988	34,6	69,68	70,1

Смачивание поверхностей заготовки и инструмента смазочными композициями является важным условием для реализации функций СОТС: смазочных, моющих, охлаждающих, диспергирующих и демпфирующих. Результаты экспериментов показали предпочтительность использования СОТС 1 в качестве базового.

#### **4.2 Проведение экспериментальных исследований по выбору базового состава СОТС для кислородсодержащих полимерных присадок**

В качестве показателя эффективности выбранных СОТС с полимерными присадками были исследованы изменения периода стойкости режущего инструмента, а также шероховатость обработанной поверхности (рис. 4.3, 4.4).

Комплексный подход к исследованию этих двух показателей позволяют более полно оценить эффективность применения полимерных присадок в СОТС и их влияние на процесс обработки материалов.

Объект исследования заготовка из стали 45, инструмент резец проходной упорный из быстрорежущей стали Р6М5. Проведенные экспериментальные исследования 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.

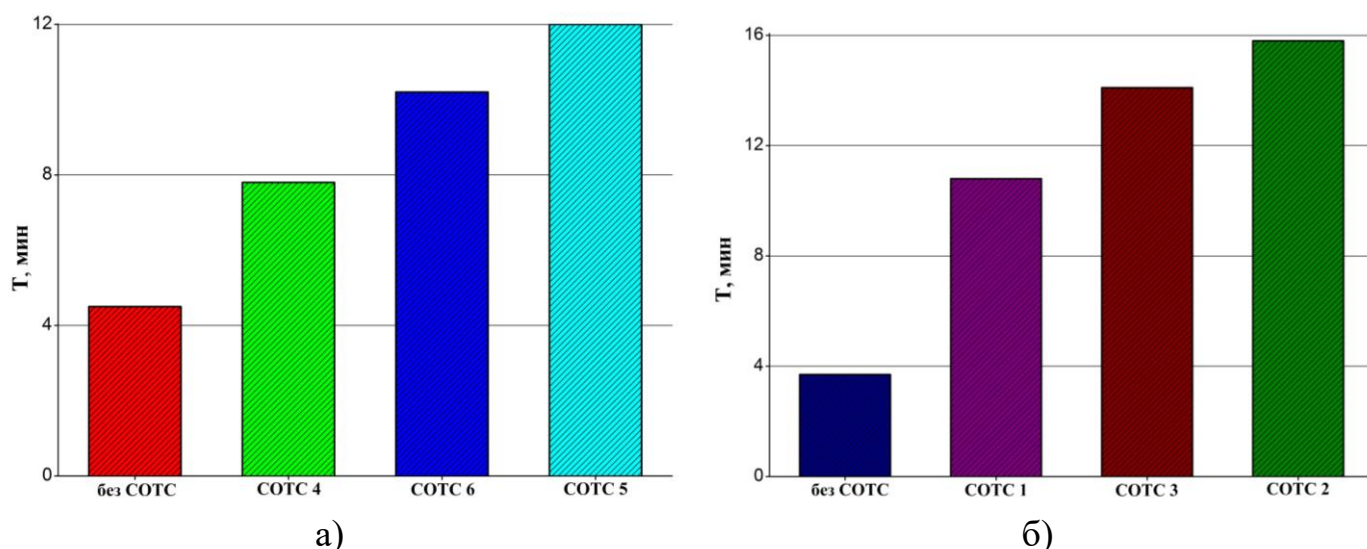


Рисунок 4.3 – Влияние различных СОТС с полимерными присадками на период стойкости режущего инструмента сталь при точении сталь 45-Р6М5

$$(V = 60 \text{ м/мин}, S = 0,1 \text{ мм/об.}, t = 0,5 \text{ мм})$$

По результатам исследований при точении заготовки стали марки 45 с использованием быстрорежущего инструмента марки Р6М5, было установлено, что применение СОТС 4 обеспечивает период стойкости около 7,8 минут. Однако введение полимерных присадок значительно улучшает этот показатель. Так, добавление ПЭГ увеличивает период стойкости до 10 минут, а добавление поливинилового спирта (ПВС) позволяет достичь 12 минут (рис. 4.3 а).

Аналогичные результаты были получены при использовании СОТС 1, где первоначальный период стойкости составил 10,5 минут. В данном случае добавление ПЭГ увеличивает этот показатель до 14 минут, в то время как добавление ПВС позволяет достичь максимального значения в 16 минут (рис. 4.3 б). Эти данные свидетельствуют о том, что кислородсодержащие полимерные присадки оказывают положительное влияние на эксплуатационные характеристики СОТС, что обусловлено их способностью снижать трение во время обработки, что, в свою очередь, способствует увеличению работоспособности режущих инструментов и улучшению качества обработанной поверхности.

Уменьшение износа режущего инструмента, экранирование адгезии между трущимися поверхностями в свою очередь способствует уменьшению значений

шероховатости обработанной поверхности. Применение выбранных полимерных присадок позволяет уменьшить шероховатость обработанной поверхности в 1,5 раза (рис. 4.4).

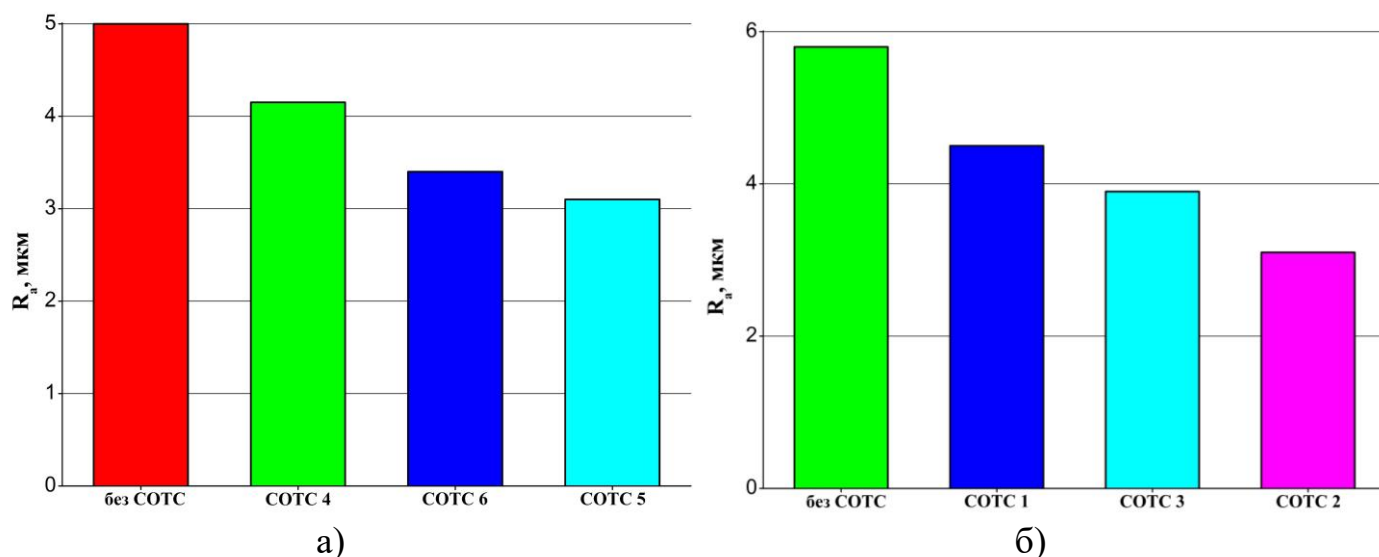


Рисунок 4.4 – Влияние различных COTS с полимерными присадками на шероховатость обработанной поверхности сталь при точении сталь 45-Р6М5 ( $V = 45$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм)

Результаты повышения периода стойкости были получены при резании титанового сплава ВТ6 с использованием резцов из твердого сплава марки ВК60М.

Проведены серии испытаний по определению периода стойкости при точении титанового сплава ВТ6 резцами ВК60М в интервале скоростей 70-100 м/мин при постоянной подаче  $S=0,5$  мм/об и глубине резания 1 мм (рис. 4.5).

Исследовалось влияние на период стойкости резцов двух различных COTS с добавлением в них кислородсодержащих полимерных присадок. Как можно заметить на графиках, повышение периода стойкости наблюдается на всем диапазоне скоростей резания. Так же, как и при использовании быстрорежущего инструмента, лучшие показатели имеет COTS 1.

Для COTS 4 период стойкости при максимальной выбранной скорости 100 м/мин составляет 26 минут, добавление в качестве присадки

полиэтиленгликоля увеличивает период стойкости до 67 минут, добавление поливинилового спирта повышает период стойкости до 91 минуты (рис. 4.5 а).

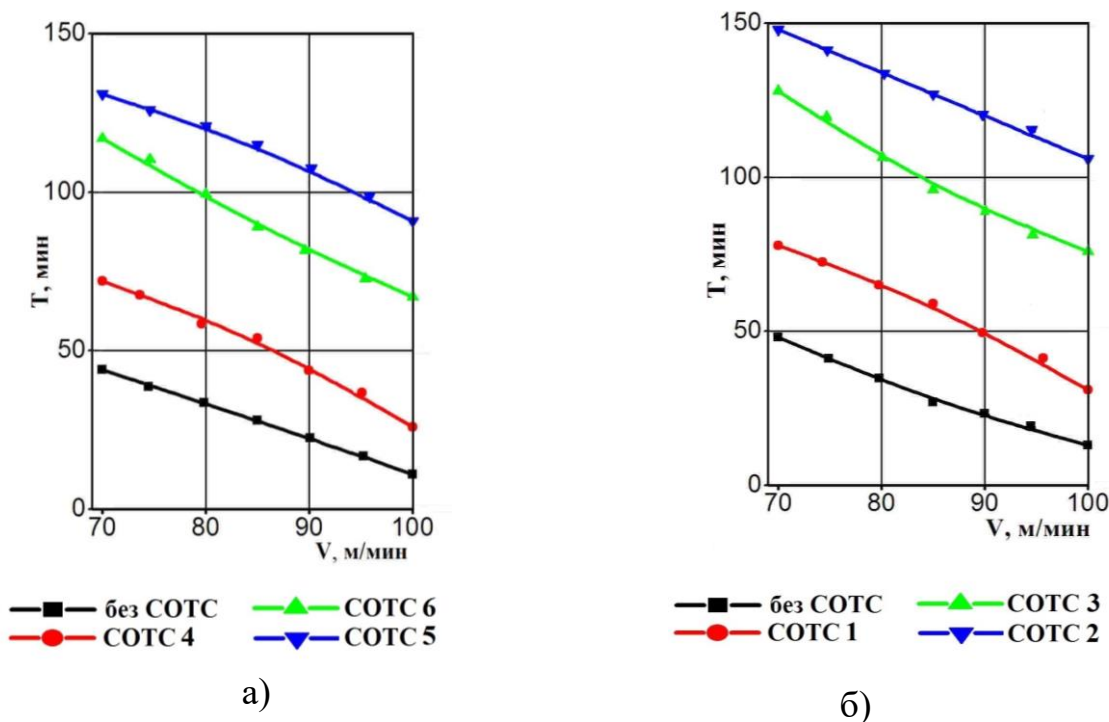


Рисунок 4.5 – Влияние различных СОТС с полимерными присадками на период стойкости при различных скоростях резания при точении ВТ6 - ВК6ОМ ( $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 1$  мм)

Как и в случае применения быстрорежущего инструмента предпочтительнее выглядит в качестве базовой СОТС 1. Период стойкости режущего инструмента с данным СОТС, при скорости резания 100 м/мин, составляет 31 минуту, присадка ПЭГ повышает период стойкости до 76 минут, присадка ПВС до 106 минут (рис. 4.5 б).

В работе также проведены эксперименты по исследованию СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при точении режущим инструментом с различными износостойкими покрытиями.

Результаты износостойкостных и температурных зависимостей при точении сталей 15X18H12C4ТЮ, 07X16H6 резцами из твердого сплава ВК8 показали эффективность применения полимерных присадок к СОТС (рис. 4.6-4.11).

Экспериментальные данные об износе и стойкости режущих инструментов были получены путем прямого наблюдения и измерения областей износа. В качестве основного параметра для оценки износа инструмента использовалась средняя ширина фаски износа задней поверхности (без учета выемок). Ширину фаски износа инструмента по задней поверхности измеряли с помощью МПБ-2.

Для обеспечения достоверности результатов эксперимента, согласно рекомендациям [44], повторялись 4 – 5 раз при отклонениях не более 8%.

Интенсивность износа определяли по измерению относительного линейного износа:

$$h_{ол} = \frac{h_{з.к} - h_{з.н}}{l_к - l_н} \quad (4.1)$$

$h_{з.к}$  – конечная или текущая величина износа инструмента по задней грани, мм;

$h_{з.н}$  – начальный износ инструмента по задней грани, мм;

$l_к$  – конечная или текущая длина пути резания, м;

$l_н$  – длина начального участка пути резания, м.

Критерием затупления режущих инструментов, в условиях чистового и получистового резания, принимали равным  $h_3^{кр} = 0,3$  мм.

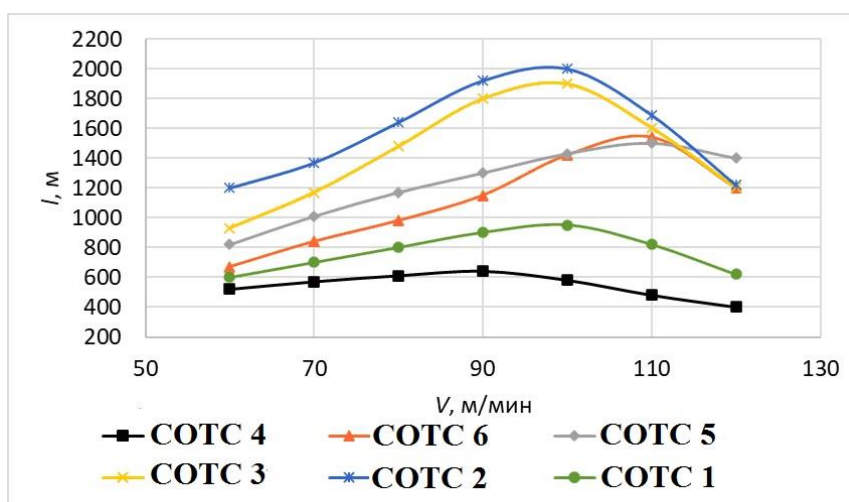


Рисунок 4.6 – Влияние скорости резания на длину пути резания при точении 07X16Н6 – ВК8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм; при  $h_3 = 0,3$  мм)

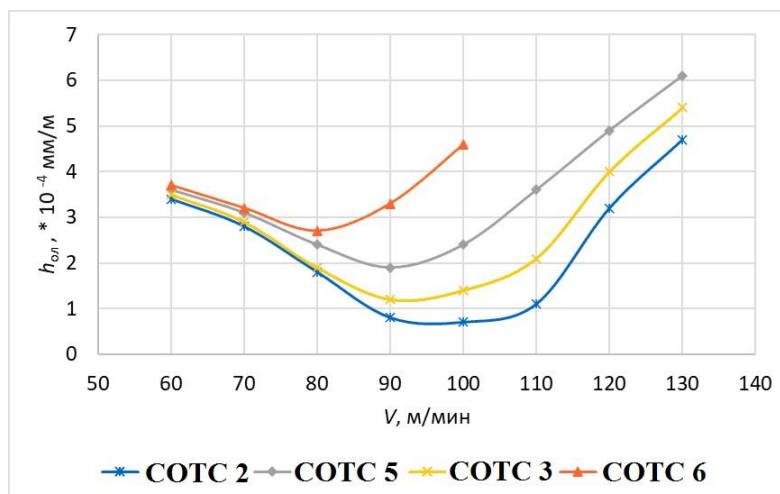


Рисунок 4.7 – Влияние скорости резания на относительный линейный износ при точении 07X16H6 – BK8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

Исследованиям температуры и методам ее измерения посвящено значительное количество работ [45, 58, 73], в которых показана важность практического изучения тепловых явлений в контактной зоне. Что в свою очередь позволяет целесообразно выбирать материал режущего инструмента, оценивать роль СОТС в процессе резания, а также разрабатывать целесообразные способы их применения. На рисунках 4.8, 4.11, графики влияния скорости резания на температурные показатели при точении различных металлов.

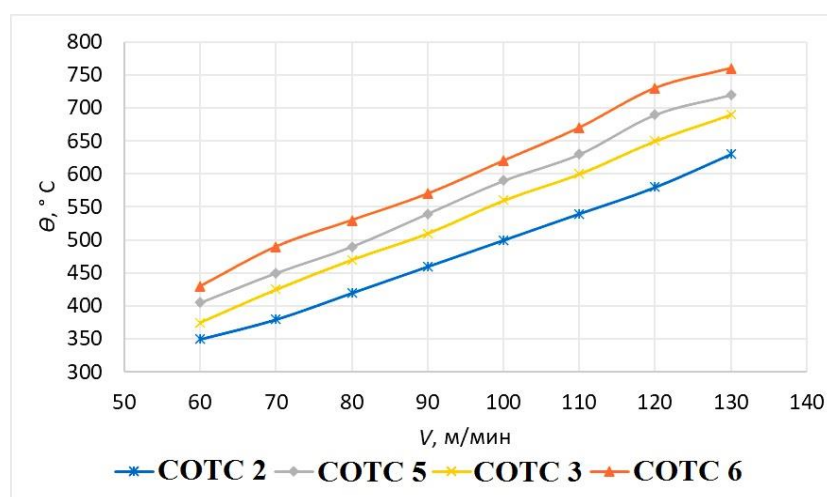


Рисунок 4.8 – Влияние скорости резания на температуру при точении 07X16H6 – BK8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

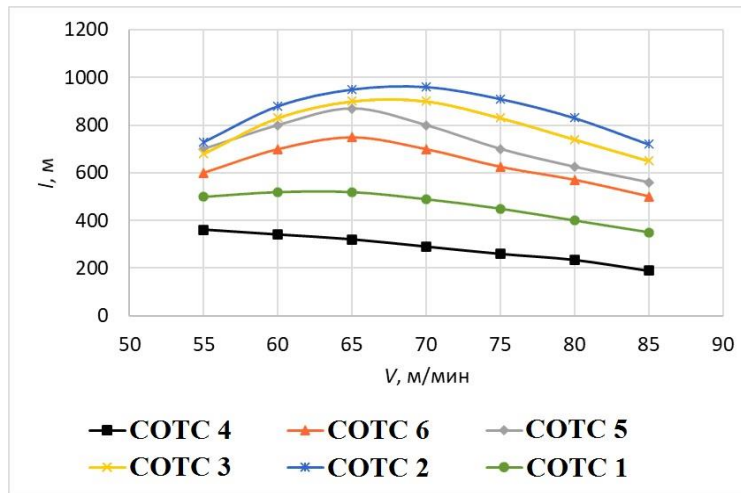


Рисунок 4.9 – Влияние скорости на путь резания при точении 15X18H12C4ТЮ – ВК8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм;  $h_3 = 0,3$  мм)

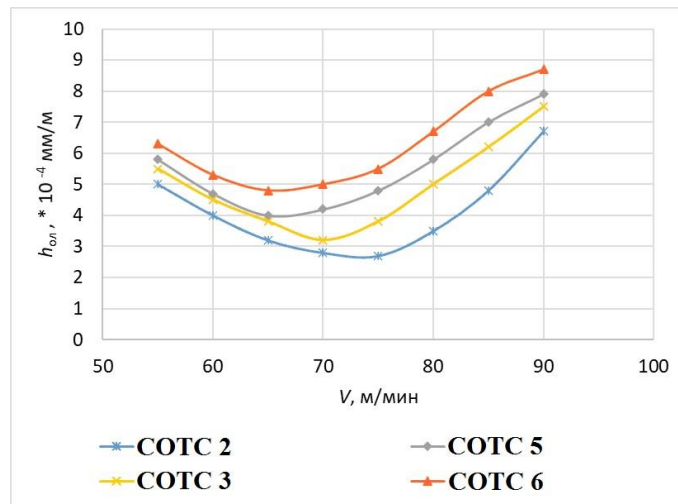


Рисунок 4.10 – Влияние скорости резания на относительный линейный износ при точении 15X18H12C4ТЮ – ВК8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

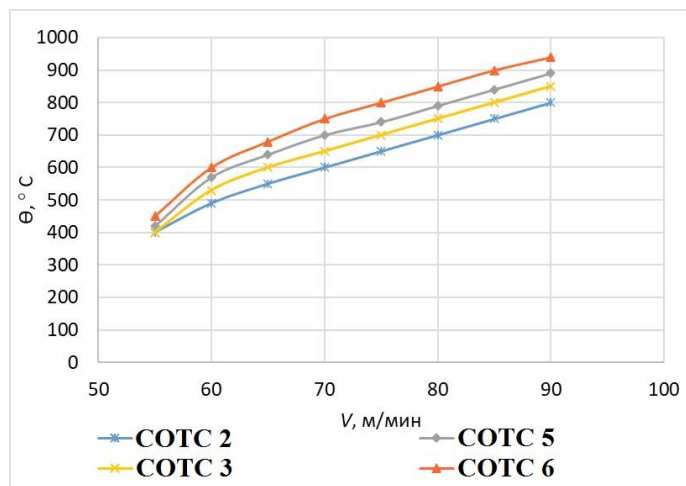


Рисунок 4.11 – Влияние скорости резания на температуру при точении 15X18H12C4ТЮ – ВК8 ( $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)

По результатам экспериментальных исследований установлено, что

- зависимость длины пути резания от скорости при всех испытуемых материалах носят экстремальный характер с максимумом при соответствующих определенных скоростях резания;

- наилучшими триботехническими характеристиками, такими как длина пути резания и относительный линейный износ, обладают СОТС 3 и СОТС 2, особенно при повышенных скоростях резания;

- зависимость температуры резания от скорости резания носит монотонно возрастающий характер. При этом наименьшее значение средней температуры резания обеспечивается при использовании СОТС— СОТС 3; СОТС 2;

- зависимость относительного линейного износа режущего инструмента от скорости резания имеет экстремальный характер с минимумом при более высоких значениях скорости резания для СОТС — СОТС 3 и СОТС 2, что позволяет повысить производительность и общую эффективность лезвийной обработки резанием.

Проведенные эксперименты по исследованию СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками при точении режущим инструментом с различными износостойкими покрытиями, в частности, TiN, TiAlN (рис. 4.12, 4.13).

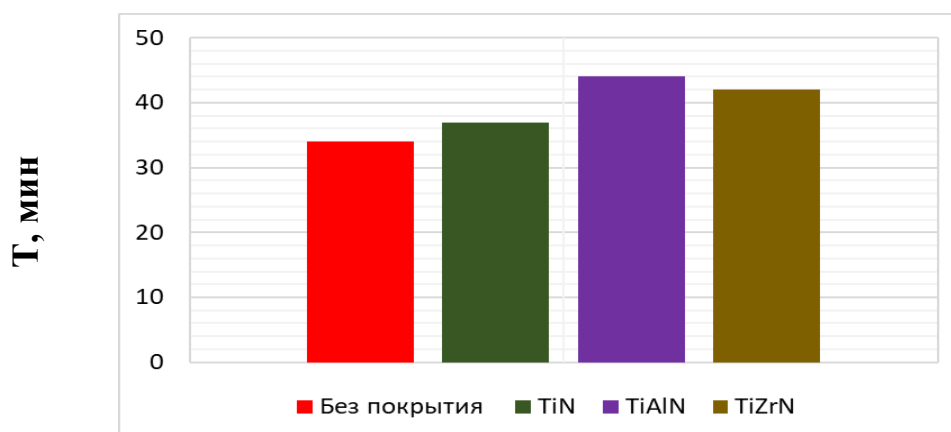


Рисунок 4.12 – Период стойкости инструмента при точении 07X16H6 – BK8 с СОТС 2 ( $V = 100$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм) с различными износостойкими покрытиями

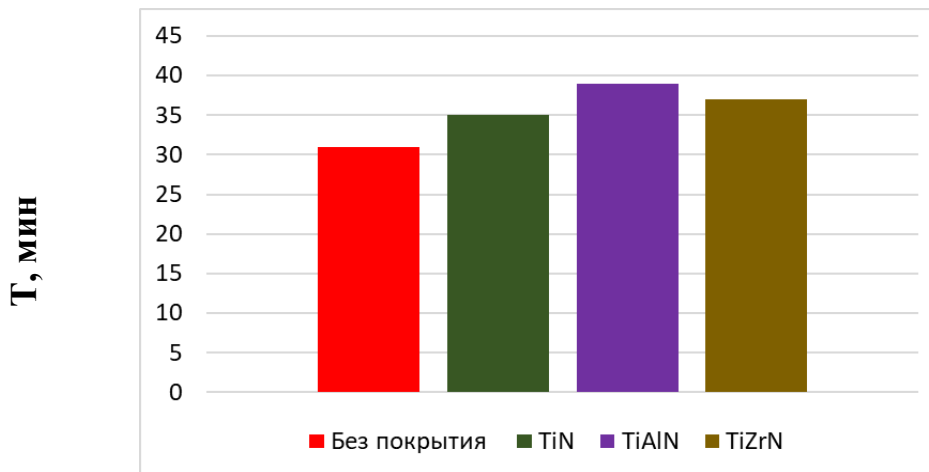


Рисунок 4.13 – Период стойкости инструмента при точении  
 15X18H12C4ТЮ – ВК8 с СОТС 2  
 ( $V = 75$  м/мин;  $S = 0,11$  мм/об;  $t = 0,5$  мм)  
 с различными износостойкими покрытиями

При этом наиболее эффективным износостойким покрытием является многослойное наноструктурированное покрытие TiAlN. При точении 07X16H6 с покрытием TiAlN и применением СОТС повышение периода стойкости составило 22 %, при точении 15X18H12C4ТЮ повышение периода стойкости составило 16 %.

Эффективность действия экспериментальных СОТС можно объяснить тем, что введение присадок способствует образованию радикалов и инициированию радикально-цепных реакций химической смазки. Кроме того, как уже отмечалось, растворенные присадки полимеров обеспечивают хорошее смачивание поверхности, что улучшает смазочные свойства СОТС. При низком поверхностном натяжении смазочная жидкость легче проникает в микроскопические зазоры между контактирующими поверхностями, что снижает трение и износ. В свою очередь это приводит к уменьшению силы резания и увеличению срока службы режущего инструмента, что является критически важным для повышения работоспособности инструмента.

В результате проведенных исследований был сделан выбор в пользу СОТС 1, в качестве базовой СОТС, с точки зрения эффективности влияния на

период стойкости режущего инструмента и шероховатости обработанной поверхности.

#### 4.3 Установление зависимости рациональных параметров применения активированного полимерсодержащего СОТС при точении

Для установления математической зависимости и выбора рациональных параметров применения активированного полимерсодержащего СОТС при точении был реализован полный факторный эксперимент  $2^2$ . Уровни факторов и интервалы варьирования, а также матрица планирования представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Матрица планирования полнофакторного эксперимента и состав опытов

Условия планирования		Факторы			
		$C, \%$	$U, В$		
		$x_1$	$x_2$		
Верхний уровень		0,9	$\pm 9$		
Основной уровень		0,6	$\pm 6$		
Нижний уровень		0,3	$\pm 3$		
Номер серии опытов	Режущий инструмент	Действительные значения		Кодированные значения	
		$C$	$U$	$x_1$	$x_2$
1	Р6М5	0,9	$\pm 9$	+	+
2		0,9	$\pm 6$	+	0
3		0,9	$\pm 3$	+	-
4		0,6	$\pm 9$	0	+
5		0,6	$\pm 6$	0	0
6		0,6	$\pm 3$	0	-
7		0,3	$\pm 9$	-	+
8		0,3	$\pm 6$	-	0
9		0,3	$\pm 3$	-	-

Интервалы варьирования факторов:  $x_1 = C$  – концентрация полимерной присадки в СОТС в диапазоне от 0,3 до 0,9 %;  $x_2 = U$  – напряжение на

коронирующем электроде в диапазоне от 3 до 9 кВ. Исследуемый параметр  $\hat{y} = T$  – период стойкости режущего инструмента.

Уровни и факторы были выбраны согласно проведенным предварительным экспериментам. Коэффициенты регрессии, полученные для различных СОТС, представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Коэффициенты регрессии зависимости периода стойкости режущего инструмента от концентрации присадки и напряжения на коронирующем электроде

Параметры	Коэффициенты регрессии					
	$T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$	$b_{11}$	$b_{22}$
СОТС 2 (+)	22,93	0,345	0	- 1,43	- 3,9	- 0,52
СОТС 3 (+)	20,05	0,45	0	- 0,425	- 1,093	- 0,523
СОТС 2 (-)	32,17	1,8	0,82	0	- 4,37	- 2,04
СОТС 3 (-)	29,4	1,16	0	- 0,96	- 2,61	- 0,65

Результаты проверки адекватности математических моделей представлены в приложении В.

Для определения оптимальных значений концентрации полимерной присадки и напряжения на коронирующем электроде проведен анализ полученных функциональных зависимостей для полученных моделей с целью выявления экстремумов. Результаты проведенных расчетов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты исследований моделей на экстремумы

Исследуемая СОТС	Оптимальные значения		Максимум (стойкость), мин. Т
	С, %	U, кВ	
СОТС 2 (-)	0,6685	6,75	32,565
СОТС 2 (+)	0,6397	5,35	23,27
СОТС 3 (-)	3,52	6,13	29,7
СОТС 3 (+)	3,57	5,86	19,96

Анализ математических моделей позволяет сделать вывод о том, что на период стойкости режущего инструмента влияет совокупность факторов, особенно при использовании СОТС 2. Для всех полученных математических моделей были построены поверхности отклика, которые представлены на рисунках 4.14 – 4.17.

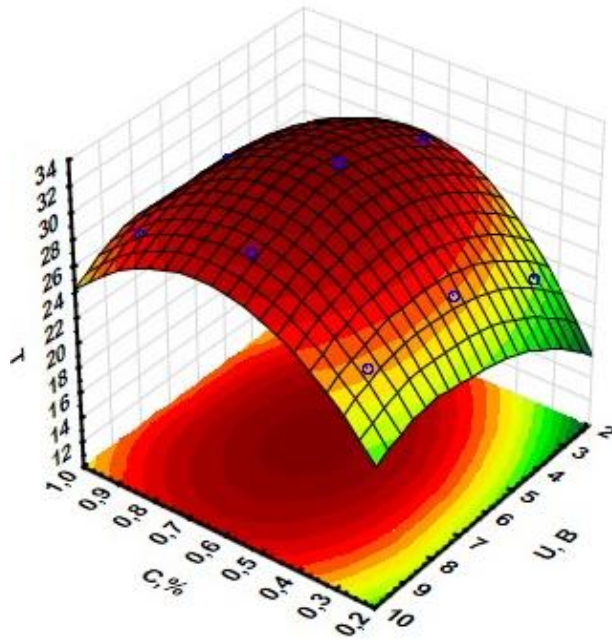


Рисунок 4.14 – Поверхности отклика регрессионной зависимости при использовании присадки ПВС (-)

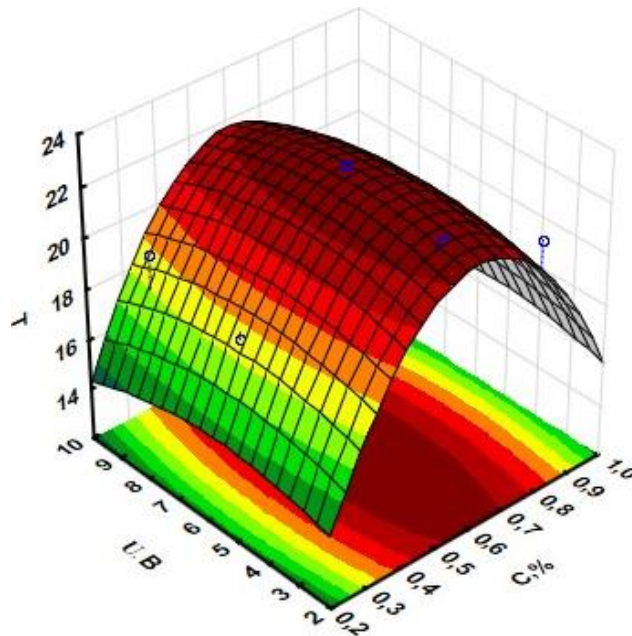


Рисунок 4.15 – Поверхности отклика регрессионной зависимости при использовании присадки ПВС (+)

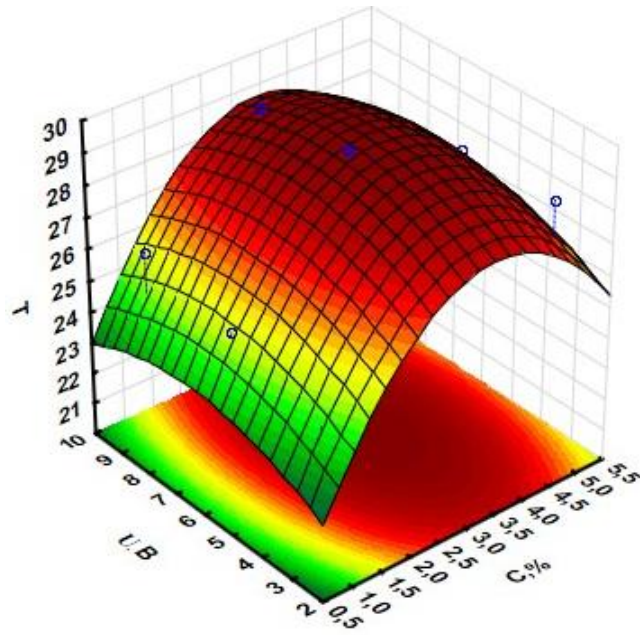


Рисунок 4.16 – Поверхности отклика регрессионной зависимости при использовании присадки ПЭГ (-)

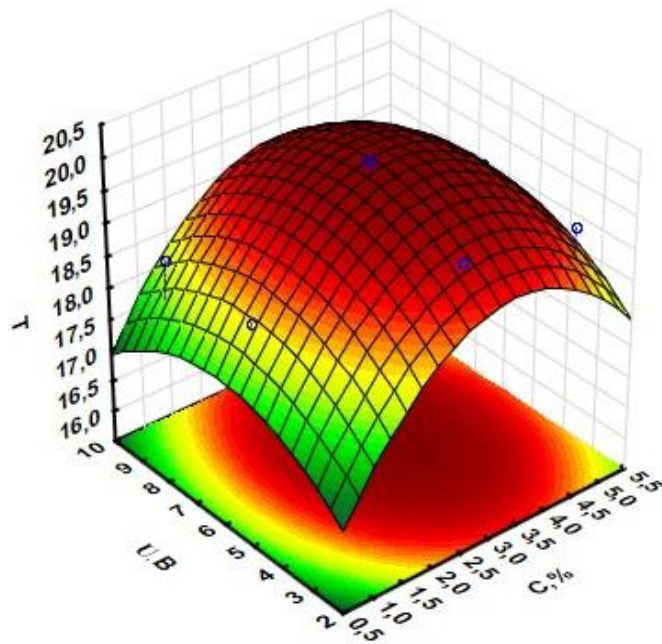


Рисунок 4.17 – Поверхности отклика регрессионной зависимости при использовании присадки ПЭГ (+)

В результате исследования моделей на экстремумы были определены оптимальные значения концентрации полимерных присадок в смазочных композициях, а также напряжения на коронирующем электроде, при которых достигается максимальный период стойкости. Наилучшие показатели периода

стойкости были зафиксированы для СОТС с добавлением поливинилового спирта, концентрация которого составляет 0,6685 %, при этом на коронирующем электроде было установлено отрицательное значение напряжения равное 6,75 кВ.

#### 4.4 Экспериментальное исследование активированных полимерсодержащих СОТС при лезвийной обработке металлов

##### 4.4.1 Влияние СОТС с присадками полимеров, активированного коронным разрядом, на износостойкость режущего инструмента при точении

Испытания по изучению износостойкостных показателей проводились с использованием оптимизированных параметров, полученных с помощью математического планирования эксперимента. Эти параметры включали концентрацию полимерных присадок в составе СОТС и напряжение на коронирующем электроде.

На рисунках 4.18 - 4.20 представлены зависимости износа режущего инструмента при точении стали 45 при использовании СОТС различного состава.

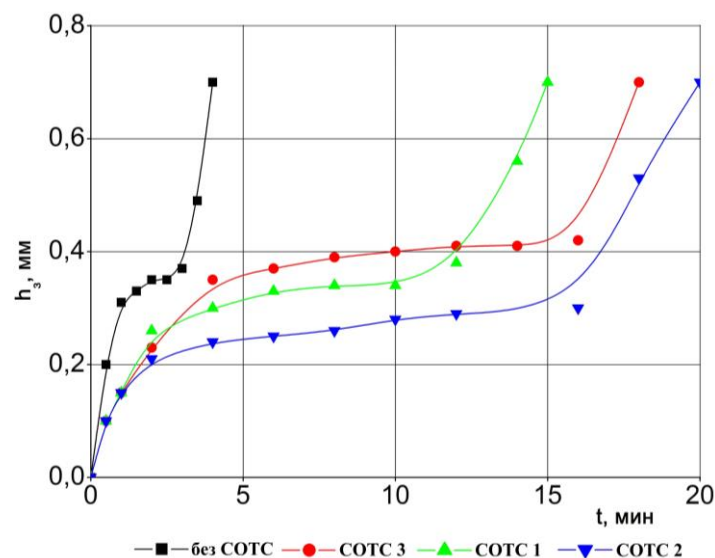


Рисунок 4.18 – Интенсивность износа режущего инструмента при точении сталь 45-Р6М5 без внешнего энергетического воздействия

$$(V = 60 \text{ м/мин}, S = 0,1 \text{ мм/об.}, t = 0,5 \text{ мм})$$

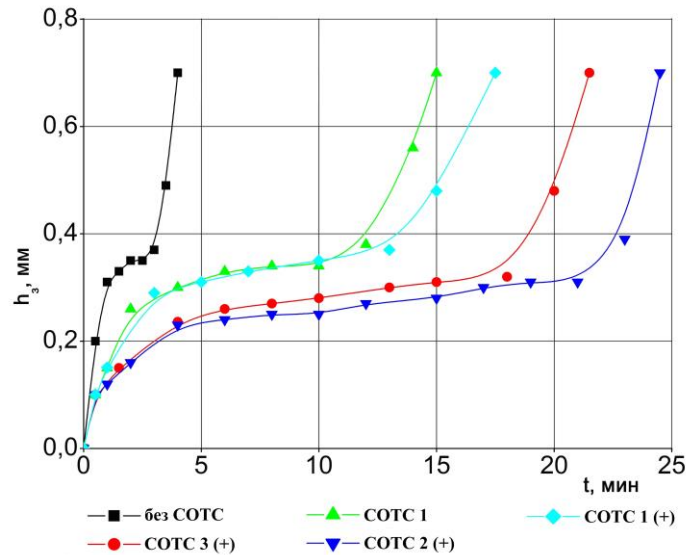


Рисунок 4.19 – Интенсивность износа режущего инструмента при точении стали 45-Р6М5 с наложением внешнего энергетического воздействия ( $V = 60$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм)

При действии активированных кислородсодержащих полимерных СОТС (рис. 4.19, 4.20) все три этапа увеличивались во времени, особенно стадия нормального износа.

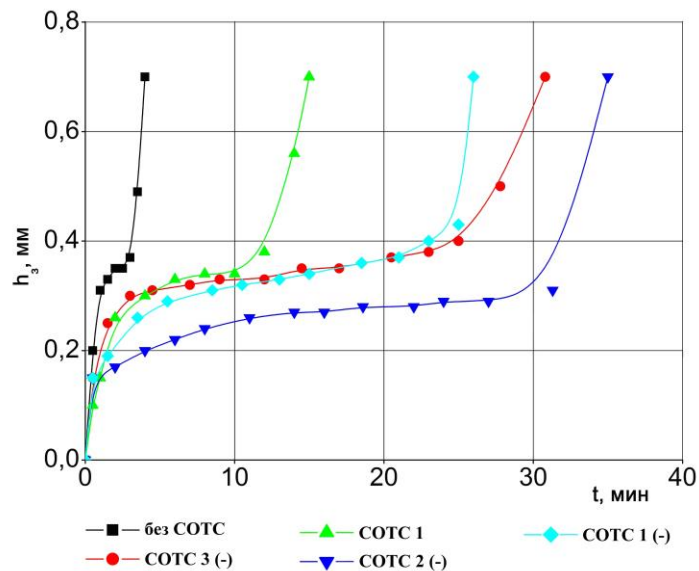


Рисунок 4.20 – Интенсивность износа режущего инструмента при точении стали 45-Р6М5 с наложением внешнего энергетического воздействия ( $V = 60$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм)

Отмечено отсутствие катастрофического износа. Исследования показали, что после резания в течение 32 минут с использованием СОТС с присадкой

поливинилового спирта при отрицательной активации, износ по задней поверхности не превышал 0,32 мм.

С присадкой полиэтиленгликоля также с отрицательным знаком на коронирующем электроде износ не превышал 0,36 мм после резания в течение 23 минут, в то время как при работе с неактивированными СОТС, период стойкости при тех же условиях испытаний составил 11 минут.

Уменьшить износ режущего инструмента, тем самым, продлив его срок службы, как видно из полученных данных, позволяют кислородсодержащие полимерные присадки, введенные в СОТС. А предварительная активация позволяет расширить эффективность применяемого СОТС.

Все вышеизложенное, дает основание считать, что использование активированных кислородсодержащих полимерных присадок, содержащихся в СОТС, является эффективным средством повышения таких параметров как периода стойкости режущих инструментов, шероховатость обработанной поверхности. Полученные результаты хорошо согласуются с развиваемой теорией, изложенной в главе 2, а последующие исследования позволяют глубже упрочить и подтвердить высказанные предположения.

#### **4.4.2 Исследование влияние основных факторов процесса резания на период стойкости режущего инструмента**

В ходе проведения экспериментов, направленных на исследование воздействия активированных экспериментальных СОТС на эксплуатационные характеристики режущих инструментов при обработке титанового сплава ВТ6, была выявлена высокая эффективность применения таких СОТС. Эти результаты согласуются с ранее полученными данными, полученными при использовании быстрорежущего инструмента марки Р6М5, что указывает на универсальность и стабильность положительного влияния полимерных добавок на производительность инструментов в различных условиях обработки.

Титановые сплавы, такие как ВТ6, характеризуются высокой прочностью и низкой теплопроводностью, что делает их обработку сложной задачей. В таких условиях использование эффективных СОТС становится особенно важным для снижения температуры в зоне резания, уменьшения трения и, как следствие, повышения срока службы инструмента. В ходе экспериментов было установлено, что активированные экспериментальные СОТС обеспечивают значительное снижение коэффициента трения между инструментом и обрабатываемым материалом, что приводит к улучшению теплоотводящих свойств и уменьшению износа режущей кромки.

Для установления математической зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи, при применении активированного полимерсодержащего СОТС при точении, был реализован полный факторный эксперимент  $2^2$ . Уровни факторов и интервалы варьирования, а также матрица планирования представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Матрица планирования полнофакторного эксперимента и состав опытов

Условия планирования		Факторы				
		$V, \text{м/мин}$		$S, \text{мм/об}$		
		$x_1$		$x_2$		
Верхний уровень		110		0,3		
Основной уровень		95		0,2		
Нижний уровень		80		0,1		
Номер серии опытов	Режущий инструмент	Действительные значения		Кодированные значения		
		$V$	$S$	$x_0$	$x_1$	$x_2$
1	ВК60М	80	0,1	+	-	-
2		80	0,3	+	-	+
3		110	0,1	+	+	-
4		110	0,3	+	+	+

Результаты экспериментов представлены в приложении Г. Режимы резания выбирались согласно рекомендациям [24].

Обработка полученных данных позволила получить следующие коэффициенты регрессии, представленные в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Коэффициенты регрессии зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи

Параметры	Коэффициенты регрессии $T = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$			
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$
СОТС 1	4,5	- 0,12	-0,06	0
СОТС 2 (+)	5,04	- 0,06	-0,058	0
СОТС 2 (+)	4,94	- 0,085	-0,029	0
СОТС 3 (-)	5,49	- 0,077	-0,026	0
СОТС 3 (-)	5,32	- 0,09	-0,029	0

Полученные на основании экспериментальных исследований эмпирические зависимости периода стойкости режущих инструментов от скорости резания и подачи при использовании различных СОТС представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи

Исследуемая СОТС	Уравнения с натуральными значениями
СОТС 1	$T = \frac{2239,5}{V^{0,75} S^{0,1}}$
СОТС 2 (-)	$T = \frac{1972,4}{V^{0,48} S^{0,05}}$
СОТС 2 (+)	$T = \frac{703,4}{V^{0,4} S^{0,1}}$
СОТС 3 (-)	$T = \frac{2397}{V^{0,6} S^{0,05}}$
СОТС 3 (+)	$T = \frac{1422}{V^{0,5} S^{0,05}}$

В результате анализа данных, полученных в ходе экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния скорости резания на период

стойкости режущего инструмента, было установлено, что использование активированных полимерных составов в качестве смазочно-охлаждающих технологических средств способствует увеличению стойкости инструмента при обработке титанового сплава ВТ6 почти в два раза при сохранении того же режима резания по сравнению с применением традиционных СОТС без добавления полимеров и активации коронным разрядом (рис. 4.21).

С увеличением скорости резания, в диапазоне 80 – 110 м/мин, наблюдается значительное уменьшение периода стойкости режущего инструмента. Это явление фиксируется как при использовании активированных экспериментальных СОТС, так и при применении базовой СОТС. Увеличение скорости резания приводит к росту тепловой нагрузки и, как следствие, к более интенсивному износу инструмента, что негативно сказывается на его износостойкости.

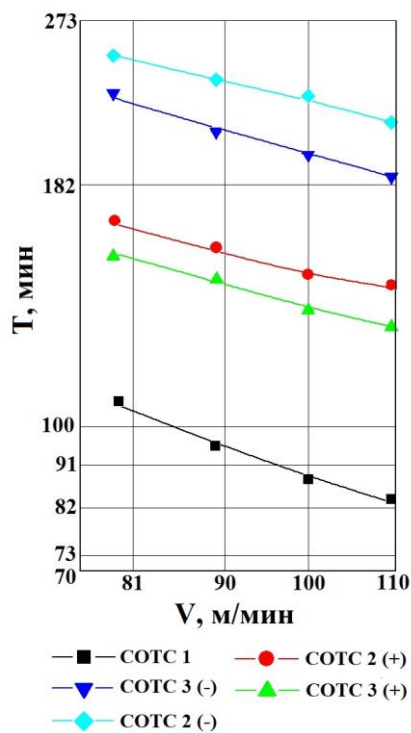


Рисунок 4.21 – Зависимость периода стойкости от скорости резания при точении ВТ6 - ВК6ОМ

Наибольший период стойкости режущего инструмента был зафиксирован при использовании поливинилового спирта в качестве присадки к СОТС с отрицательной активацией. В этом случае максимальный период стойкости

составил 251 минуту при скорости резания 80 м/мин. Это значение значительно превышает показатели базовой СОТС, где при той же скорости резания период стойкости составил всего 106 минут.

Данные результаты свидетельствуют о том, что применение активированных экспериментальных СОТС, с присадкой ПВС, может существенно повысить эффективность процесса обработки, обеспечивая более длительный срок службы инструмента. Это связано с улучшением смазочных и охлаждающих свойств СОТС, что позволяет более эффективно отводить тепло от зоны резания и снижать трение между инструментом и обрабатываемым материалом. Таким образом, использование активированных СОТС представляет собой перспективный подход для повышения производительности и надежности процессов механической обработки.

С увеличением величины подачи, как с применением активированных полимерсодержащих СОТС, так и с применением базовой СОТС, наблюдается уменьшение периода стойкости  $T$  (рис. 4.22).

Однако, уменьшение  $T$  менее интенсивно по сравнению с влиянием параметра скорости резания. Из представленных графиков можно заметить, что наибольшее влияние на период стойкости режущего инструмента оказывает скорость резания.

Исследование периода стойкости режущего инструмента показало, что активированные полимерсодержащие СОТС значительно увеличивают работоспособность инструмента по сравнению с неактивированными. Это связано с активацией молекул смазочной жидкости энергией коронирующего электрода, что инициирует образование свободных радикалов и цепных реакций до контактной зоны. В результате образуются эффективные смазочные пленки на границе инструмент – заготовка, что усиливает смазочный эффект и увеличивает период стойкости режущего инструмента.

Анализ полученных результатов показывает, что при использовании экспериментальных составов СОТС с наложением внешнего энергетического воздействия коронным разрядом, наибольший эффект достигается при

отрицательном заряде на коронирующем электроде. Это можно объяснить разностью энергетического воздействия на исследуемое СОТС. При отрицательном знаке на коронирующем электроде - энергия заряженных частиц выше, чем при положительном знаке.

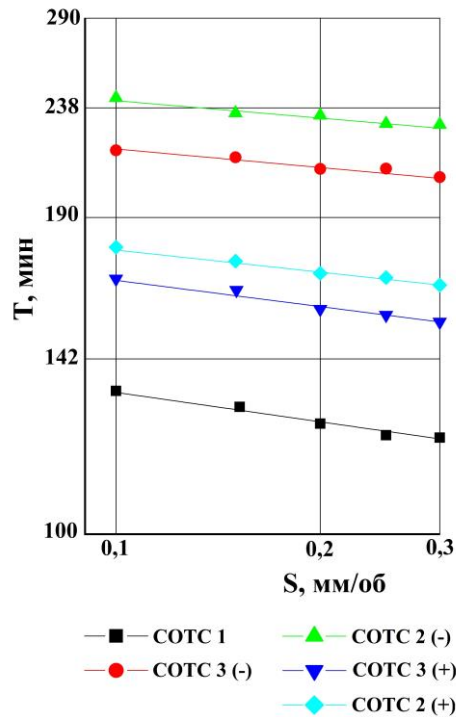


Рисунок 4.22 – Зависимость периода стойкости от подачи при точении ВТ6 - ВК6ОМ

Полученные экспериментальные данные, а также результаты исследований [57, 79] подтверждают изложенную гипотезу о механизме смазочного действия активированных полимерсодержащих СОТС при резании металлов. Эффективное действие исследуемых СОТС объясняется протеканием химических реакций на контактных площадках резца и стружки (Глава 2). Происходит разрыв связи С-Н, С-С, С-О с последующим образованием в смазочных материалах карбоксильных групп, то есть промежуточных смазочных элементов – свободных радикалов. Результаты полностью согласуются с гипотезой, изложенной выше, и подтверждают радикально-цепной механизм смазочного действия среды в процессе резания различных металлов.

Таким образом, полученные данные подтверждают целесообразность применения активированных экспериментальных СОТС для повышения

эксплуатационных характеристик режущих инструментов при обработке как титановых сплавов, так и более традиционных материалов, таких как конструкционные стали.

#### 4.4.3 Исследование шероховатости поверхности при точении с использованием СОТС, содержащего полимерные присадки, активированного коронным разрядом

Применение активированного СОТС с полимерными присадками позволяет значительно снизить шероховатость поверхности стали марки 45 при точении на 30–40 % по сравнению с использованием стандартного СОТС (рис. 4.23).

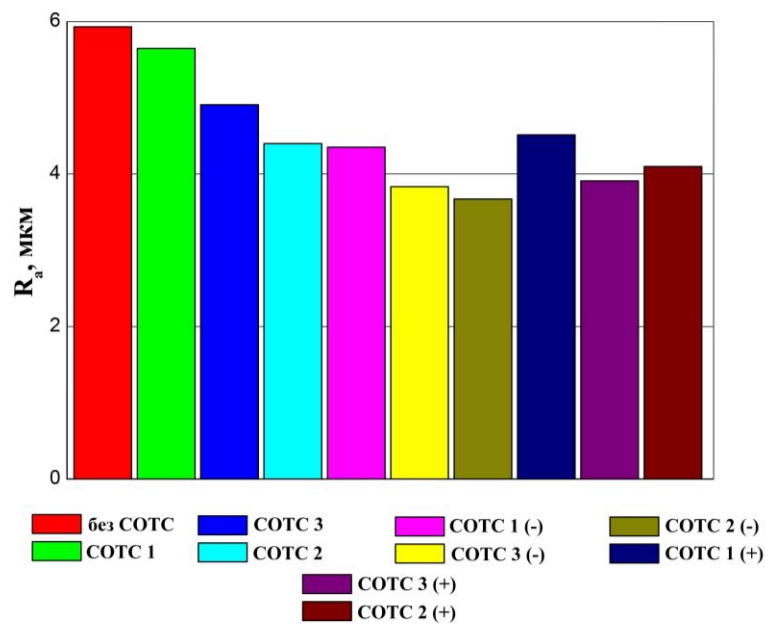


Рисунок 4.23 – Шероховатость обработанной поверхности при электростатической активации СОТС с присадками ПВС и ПЭГ при точении сталь 45 - Р6М5 ( $V=30$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм)

В процессе резания стали марки 12Х18Н10Т с применением активированного СОТС, содержащего полимерные компоненты, также наблюдается положительный эффект при всех диапазонах скоростей резания.

В частности, снижение шероховатости составило от 20% до 40%. (Приложение Д). При этом наибольший положительный эффект достигается при использовании положительного заряда на электроде по сравнению со сталью марки 45 (табл. 4.8).

Таблица 4.8 – Результаты экспериментов по определению шероховатости  $R_a$  при точении стали 45

Режимы резания					
$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм
45	0,1	0,5	60	0,1	0,5
Обрабатываемый материал					
Виды СОТС	Ст 45		Ст 45		
	$R_a$ , мкм		$R_a$ , мкм		
Резание без СОТС	5,7381		5,95029		
СОТС 1	5,4365		5,4868		
СОТС 1 (+)	4,246		3,978		
СОТС 1 (-)	4,2115		4,47143		
СОТС 2	4,83825		4,9838		
СОТС 3	4,32525		5,0938		
СОТС 3 (+)	3,02925		3,958		
СОТС 3 (-)	2,92525		3,8		
СОТС 2 (+)	3,7165		3,793		
СОТС 2 (-)	3,53825		3,28414		

При обработке заготовки из титанового сплава ВТ5-1 с использованием активированных полимерсодержащих СОТС было зафиксировано незначительное уменьшение средней высоты микронеровностей  $R_a$ . В диапазоне скоростей резания это уменьшение составило от 20% до 30% (Приложение Е).

Согласно концепции, представленной в данной работе, механизм эффективного действия этих веществ заключается в следующем: при воздействии коронного разряда на полимерсодержащее СОТС происходит деструкция растворённых в нём веществ с образованием активных радикалов. Присутствие этих радикалов в СОТС увеличивает его эффективность, поскольку они инициируют цепь окислительных реакций, что приводит к образованию плёнок и экранированию сил адгезии в зоне резания. Эти пленки могут служить барьером,

препятствующим прямому контакту между инструментом и обрабатываемым материалом, что снижает силы адгезии и, следовательно, уменьшает износ инструмента и улучшает качество обработки.

#### **4.5 Исследование СОТС с полимерными присадками, активированного коронным разрядом при сверлении**

Сверление является одним из самых распространенных методов получения отверстий в различных материалах, и в этом процессе ключевую роль играет режущий инструмент — сверло. Сверло представляет собой более сложный инструмент по сравнению с резцом, что обусловлено особенностями его конструкции и функциональными задачами.

Процесс сверления протекает в более сложных условиях чем точение. Это связано с несколькими факторами: во-первых, отвод стружки из зоны резания затруднен, что может приводить к её накоплению и ухудшению условий резания; во-вторых, подвод охлаждающей жидкости также может быть ограничен, что негативно сказывается на теплоотводе и увеличивает риск перегрева инструмента и обрабатываемого материала. Кроме того, в процессе сверления наблюдается значительное трение как между стружкой и поверхностью канавок сверла, так и между самим сверлом и обработанной поверхностью. Это трение приводит к большому выделению тепла, что, в свою очередь, вызывает повышенный нагрев сверла и может привести к его термическому разрушению или быстрому износу.

Если рассматривать процесс стружкообразования на небольшом участке режущей кромки сверла, то он подчиняется тем же закономерностям, что и при точении. В этом контексте можно выделить несколько ключевых явлений: упругие и пластические деформации, тепловыделение, наростообразование и упрочнение материала. Эти процессы происходят по сходным причинам, однако

их проявления могут быть более выраженными при сверлении из-за особенностей геометрии сверла и условий резания.

Упругие деформации возникают в результате воздействия сил резания на материал, в то время как пластические деформации связаны с изменением структуры материала, что может приводить к упрочнению и изменению механических свойств обрабатываемого материала. Тепловыделение, как уже упоминалось, становится следствием трения и пластических деформаций, что приводит к повышению температуры в зоне резания и может негативно влиять на стойкость инструмента.

Таким образом, сверление представляет собой сложный процесс, требующий учета множества факторов, влияющих на эффективность и качество обработки. Понимание этих процессов и явлений является ключевым для разработки более эффективных методов сверления, выбора оптимальных режимов резания и повышения износостойкости режущего инструмента.

#### **4.5.1 Исследование влияния состава СОТС, активированного коронным разрядом, на крутящий момент при сверлении**

Как указывалось выше, процесс сверления является специфической операцией, что предъявляет особые требования к составу СОТС.

Практический опыт и лабораторные эксперименты показывают, что наиболее эффективными являются смазочно-охлаждающие технологические средства с добавками химически активных веществ, которые способны образовывать радикалы.

Цель данного исследования — подтвердить гипотезу, выдвинутую в работе, о воздействии активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными добавками на процесс сверления различных металлов. Изучалось воздействие СОТС с полимерными добавками, активированных коронным разрядом на величину крутящего момента при сверлении металлических материалов. Режимы

резания выбирались согласно [72] для операции сверления стали 45, нержавеющей стали 12X18H10T и титанового сплава BT5-1. Подача СОТС осуществлялась капельным путем и составила 12-15 мл/мин.

Результаты показали, что активированные СОТС с добавлением кислородсодержащих полимерных присадок способствуют снижению крутящего момента. Наибольший эффект от использования СОТС, содержащих активированные полимеры, был зафиксирован при сверлении титана BT5-1, что иллюстрируется данными, представленными на рисунке 4.24.

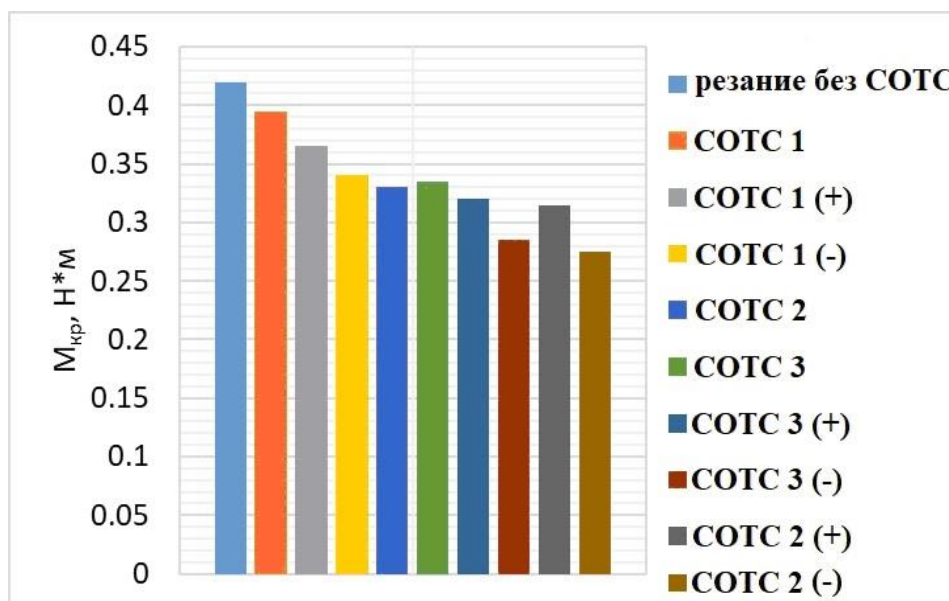


Рисунок 4.24 – Диаграмма крутящего момента при сверлении BT5-1-P6M5K5 с использованием различных СОТС ( $V = 26$  м/мин,  $t = 3,35$  мм,  $S = 0,1$  мм/об)

Данный эффект обусловлен уникальными физико-механическими свойствами титана, которые требуют особого подхода в выборе СОТС для обеспечения оптимальных условий резания. Необходимо отметить, что как активированные, так и не активированные коронным разрядом полимерсодержащие СОТС показали свою эффективность при обработке сталей марок 45 и 12X18H10T, хотя и в меньшей степени по сравнению с обработкой титанового сплава BT5-1. Это свидетельствует о том, что полимерные добавки могут оказывать положительное влияние на процесс резания в различных

материалах, однако их эффективность может варьироваться в зависимости от свойств обрабатываемого материала.

В частности, применение поливинилового спирта в качестве присадки позволило значительно снизить крутящий момент при сверлении стали 12X18H10T, уменьшив его с 0,84 до 0,54 Н·м (табл. 4.9).

При обработке титанового сплава BT5-1 были получены следующие результаты: для базового СОТС значение  $M_{кр}$  составило 0,39 Н·м, в то время как применение активированного СОТС позволило снизить этот показатель до 0,26 Н·м.

Таблица 4.9 – Значения крутящего момента при использовании различных экспериментальных СОТС

Режимы резания					
$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм
16	0,1	3,35	18	0,1	3,35
Обрабатываемый материал					
Виды СОТС	Ст45		12X18H10T		
	$M_{кр}$ , Н·м		$M_{кр}$ , Н·м		
Резание без СОТС	0,783		0,943		
СОТС 1	0,695		0,84		
СОТС 1 (+)	0,635		0,769		
СОТС 1 (-)	0,57		0,721		
СОТС 2	0,612		0,745		
СОТС 3	0,648		0,755		
СОТС 3 (+)	0,56		0,665		
СОТС 3 (-)	0,5		0,6		
СОТС 2 (+)	0,543		0,638		
СОТС 2 (-)	0,455		0,542		

Для стали 45 значение  $M_{кр}$  СОТС 1 составило 0,69 Н·м, в то время как использование активированного полимерсодержащего СОТС обеспечило снижение этого показателя до 0,45 Н·м.

Эти результаты подтверждают, что активированные экспериментальные СОТС значительно улучшают условия резания, снижая трение и, как следствие, крутящий момент. Это ведет к повышению производительности процесса обработки и снижению износа режущего инструмента (рис. 4.25).

В процессе изучения различных составов СОТС было установлено, что наилучшие результаты в плане обеспечения смазочных свойств показало СОТС, содержащее добавку поливинилового спирта с отрицательной активацией.

Использование СОТС, содержащего полимеры, позволяет снизить величину крутящих моментов за счёт уменьшения трения и работы, затрачиваемой на деформацию снятия стружки, а также стабилизирует величины крутящего момента за счёт уменьшения адгезии обрабатываемого материала (рис. 4.25).

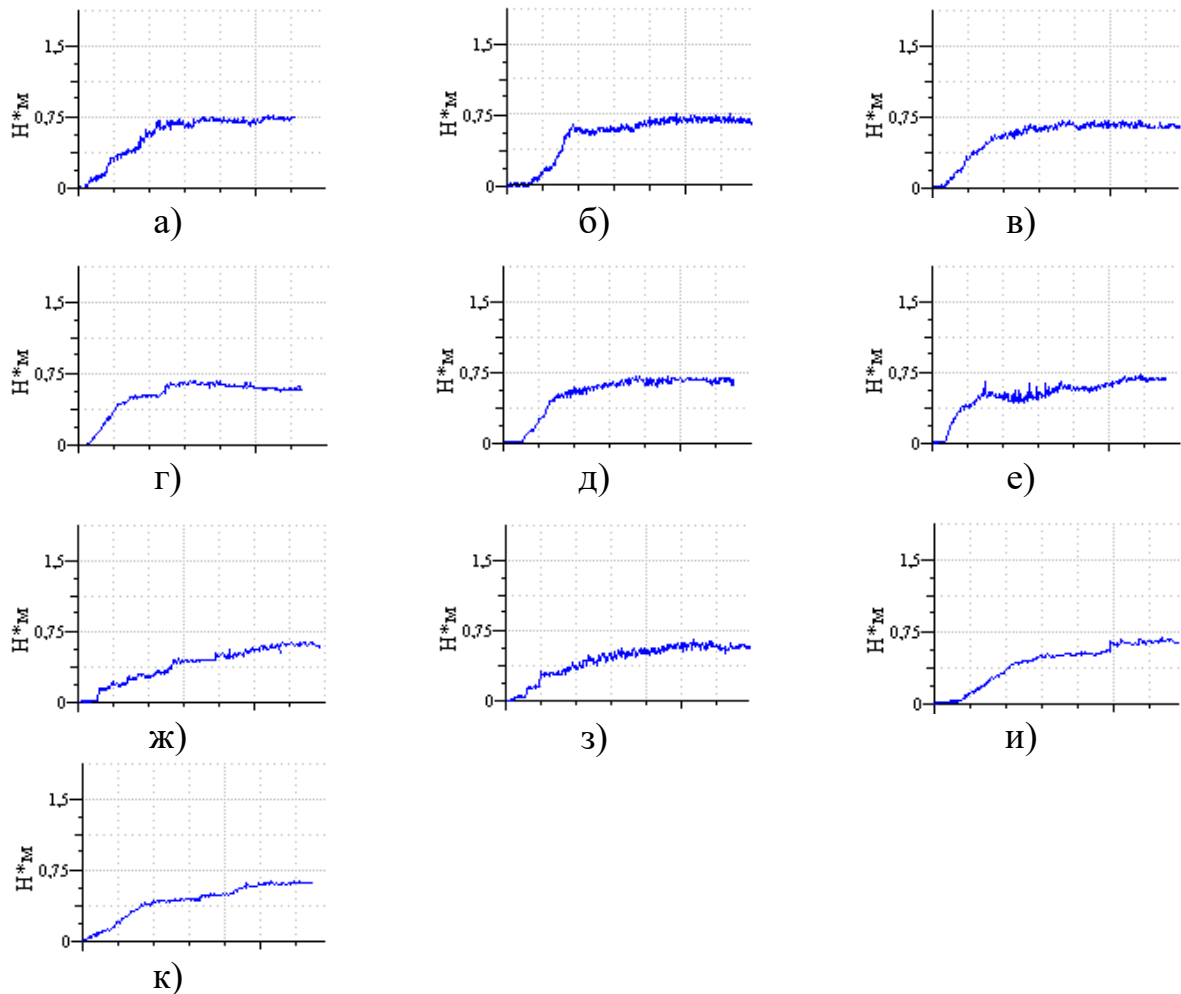


Рисунок 4.25 – Трибограммы крутящего момента при сверлении стали 45 с использованием активированных и неактивированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС ( $V = 26$  м/мин,  $t = 3,35$  мм,  $S = 0,1$  мм/об):  
а – резание без СОТС; б – СОТС 1; в – СОТС 1 (+); г – СОТС 1 (-);  
д – СОТС 2; е – СОТС 3; ж – СОТС 3 (+); з – СОТС 3 (-); и – СОТС 2 (+);  
к – СОТС 2 (-)

Из сравнения осциллограмм следует, что из всех исследуемых составов, максимальное стабилизирующее действие на  $M_{кр}$  при сверлении стали 45 оказывает СОТС с присадкой ПВС при отрицательном знаке на коронирующем электроде.

При изучении смазочных материалов с полимерными присадками было обнаружено, что коронный разряд разрушает полимерные молекулы с образованием реакционноспособных макрорадикалов. Макрорадикалы адсорбируются на металлах, снижая поверхностную энергию и создавая защитные смазочные слои, что облегчает процесс сверления.

#### **4.5.2 Воздействие СОТС с полимерными присадками, активированного коронным разрядом, на период стойкости режущего инструмента при сверлении**

Для установления математической зависимости стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи при применении активированного полимерсодержащего СОТС при сверлении, был реализован полный факторный эксперимента  $2^2$ . При проведении экспериментов использовались сверла марки Р6М5К5, обрабатывалась заготовка из титанового сплава ВТ6.

Уровни факторов и интервалы варьирования, а также матрица планирования представлены в таблице 4.10.

Результаты экспериментов представлены в приложении Ж. Режимы резания выбирались согласно рекомендациям [72]. Обработка результатов осуществлялась аналогично операции точения. После серии проведенных экспериментов получены коэффициенты регрессии (табл. 4.11).

В ходе проведенных экспериментов было исследовано воздействие скорости резания и величины подачи на эффективность применения исследуемых смазочно-охлаждающих технологических средств. Основной целью данного исследования было выявление оптимальных параметров обработки, которые

способствуют улучшению качества обработки материалов и увеличению работоспособности режущего инструмента.

Таблица 4.10 – Матрица планирования полнофакторного эксперимента и состав опытов

Условия планирования		Факторы				
		V, м/мин		S, мм/об		
		$x_1$		$x_2$		
Верхний уровень		19		0,15		
Основной уровень		16		0,12		
Нижний уровень		13		0,09		
Номер серии опытов	Режущий инструмент	Действительные значения		Кодированные значения		
		V	S	$x_0$	$x_1$	$x_2$
1	P6M5K5	13	0,09	+	-	-
2		13	0,15	+	-	+
3		19	0,09	+	+	-
4		19	0,15	+	+	+

Таблица 4.11 – Коэффициенты регрессии зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи

Параметры	Коэффициенты регрессии			
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{12}$
Эфтол	4,07	- 0,077	- 0,028	0
СОТС 2 (+)	4,28	- 0,093	-0,053	0
СОТС 3 (+)	4,23	- 0,071	-0,035	0
СОТС 2 (-)	4,37	- 0,11	-0,055	0
СОТС 3 (-)	4,28	- 0,11	-0,029	0

Эмпирические зависимости периода стойкости режущих инструментов при использовании различных СОТС, полученные на основании экспериментальных исследований представлены в таблице 4.12.

Эксперименты проводились с различными экспериментальными СОТС, что позволило сравнить их эффективность в зависимости от условий резания. Для этого были выбраны несколько режимов скорости резания и величины подачи, которые варьировались в широком диапазоне.

Таблица 4.12 – Зависимости периода стойкости режущего инструмента от скорости резания и подачи

Исследуемая СОТС	Уравнения с натуральными значениями
СОТС 1	$T = \frac{140,3}{V^{0,4} S^{0,11}}$
СОТС 2 (-)	$T = \frac{244,7}{V^{0,58} S^{0,21}}$
СОТС 2 (+)	$T = \frac{177,7}{V^{0,49} S^{0,2}}$
СОТС 3 (-)	$T = \frac{278,6}{V^{0,58} S^{0,11}}$
СОТС 3 (+)	$T = \frac{142,6}{V^{0,37} S^{0,14}}$

Эффективность СОТС оценивалась по количеству полученных отверстий. Установлено, что наибольшее влияние на эффективность СОТС оказывает скорость резания (рис. 4.26).

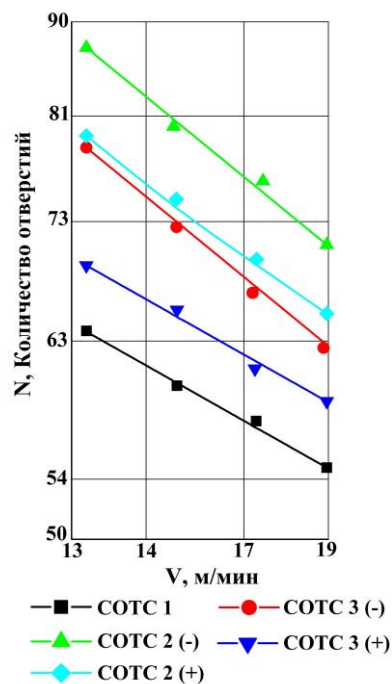


Рисунок 4.26 – Зависимость периода стойкости от скорости резания при сверлении ВТ6 – Р6М5К5

Повышение скорости резания с 13 метров в минуту до 19 метров в минуту приводит к снижению стойкости инструмента в 1,3 раза.

Увеличение подачи также снижает стойкость инструмента, хотя и в меньшей степени, чем скорость резания — в 1,1 раза (рис. 4.27).

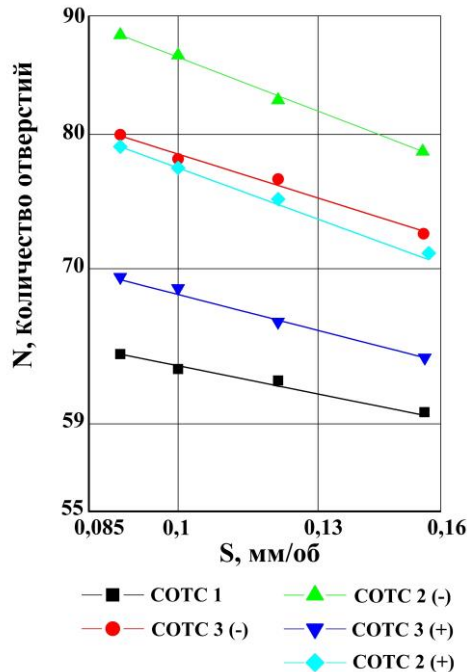


Рисунок 4.27 – Зависимость периода стойкости от подачи при сверлении  
ВТ6 – Р6М5К5

Проведенные опыты показывают, что применение активированных полимерсодержащих СОТС позволяет повысить стойкость инструмента в 1,6 раза при использовании в качестве присадки к СОТС поливинилового спирта, активированного отрицательно, и в 1,4 раза при использовании присадки полиэтиленгликоля, также активированного отрицательно по сравнению с применением базовой СОТС.

Исследования показали, что использование экспериментальных СОТС с последующим внешним энергетическим воздействием способствует увеличению работоспособности режущего инструмента благодаря их способности генерировать свободные радикалы и инициировать цепные реакции. Высокая эффективность растворённых полимерных добавок в СОТС объясняется несколькими ключевыми химическими и физическими процессами, происходящими в зоне контакта между инструментом и обрабатываемым

материалом. Одним из основных механизмов, способствующих этой эффективности, является образование перекиси водорода ( $H_2O_2$ ) в результате реакций, инициируемых коронным разрядом.

Коронный разряд представляет собой явление, при котором электрическое поле приводит к ионизации молекул газа, что, в свою очередь, вызывает образование активных частиц, таких как свободные радикалы.

Взаимодействие этих радикалов с растворёнными полимерами в СОТС приводит к образованию перекиси водорода, которая в условиях повышенной температуры и давления может разлагаться на атомарный кислород (O) и радикалы гидроксила ( $\bullet OH$ ). Эти химически активные виды обладают высокой реакционной способностью и способны взаимодействовать с поверхностями, как инструмента, так и обрабатываемого материала.

Таким образом, комплексное воздействие растворённых полимерных присадок в СОТС и их активация коронным разрядом не только способствует образованию активных химических видов, но и обеспечивает формирование стабильных смазочных плёнок, которые значительно увеличивают период стойкости режущего инструмента.

#### **4.6 Исследование зоны вторичных деформаций и определение микротвердости металлов после обработки резанием с использованием СОТС с полимерными присадками**

Исследование процесса стружкообразования является важным аспектом механической обработки, так как оно позволяет глубже понять механизмы, происходящие в зоне резания. В данном исследовании был изучен процесс формирования корней стружки, что является критически важным для оценки качества обработки и понимания влияния различных факторов на процесс резания.

В качестве исходного материала для заготовки была выбрана сталь марки 45, известная своей хорошей обрабатываемостью и распространённостью в производстве. Эта конструкционная сталь обладает сбалансированными механическими свойствами, что делает её подходящей для широкого спектра механических операций. Режущий инструмент, использованный в эксперименте, представляет собой резец из быстрорежущей стали P6M5, который характеризуется высокой стойкостью к износу и способностью сохранять твёрдость при повышенных температурах, что делает его идеальным для работы с данными сталями.

Процесс резания проводился при следующих параметрах: скорость резания  $V = 45$  м/мин и подача  $S = 0,1$  мм/об. Эти параметры были выбраны с целью оптимизации процесса стружкообразования и получения качественных корней стружки. Скорость резания 45 м/мин является распространённой для обработки стали марки 45, что позволяет достичь необходимого уровня производительности без значительного перегрева инструмента.

Каждый образец, полученный в ходе эксперимента, был проанализирован с использованием микроскопа МИМ – 8, при увеличении 300 раз. Данный метод позволяет детально рассмотреть структуру корней стружки и выявить особенности их формирования.

Примеры полученных фотографий корней стружек представлены на рисунке 4.28.

Эти изображения служат наглядным подтверждением процесса стружкообразования и позволяют провести дальнейший анализ, включая оценку геометрических параметров стружки, таких как её форма, размер и структура.

Как можно заметить из рисунка 4.28 при обработке заготовки из стали 45 с использованием СОТС 1 наблюдался нарост.

Применение экспериментальных СОТС с последующим внешним энергетическим воздействием оказывает положительный эффект на механическую обработку. Это проявляется в уменьшении размера зоны вторичных деформаций и образовании нароста.



а)

б)

Рисунок 4.28 – Фотоснимки корней стружки при свободном точении

стали 45 – Р6М5 (увел.  $\times 300$ ): а) СОТС 1, б) СОТС 2 (-);

( $V = 45$  м/мин.,  $S = 0,1$  мм/об)

Как известно, одной из причин образования нароста является то, что при определенных температурах в зоне резания происходит адгезионное схватывание ювенильной поверхности стружки и инструмента. Сила трения, возникающая в зоне контакта, зависит от температуры в зоне образования стружки. Именно поэтому температура в зоне резания влияет на условия образования нароста [99]. Применение активированных СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками позволяет уменьшить трение на передней поверхности режущего инструмента и тем самым уменьшить температуру в зоне резания.

В результате применения СОТС с добавками полимеров удалось уменьшить как область вторичных деформаций, так и величину нароста. Это говорит о высокой эффективности этих жидкостей в качестве смазочного материала.

Важным параметром процесса стружкообразования является угол сдвига  $\beta$ . От его величины зависят коэффициенты укорочения стружки и работа стружкообразования.

Увеличение угла сдвига приводит к уменьшению деформации срезаемого слоя и работы стружкообразования. В связи с этим, были измерены углы сдвига  $\beta$  для стали 45 при использовании различных составов СОТС. Также от угла сдвига зависит коэффициент укорочения стружки. Результаты расчетов угла сдвига  $\beta$  представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Значения угла сдвига  $\beta$  при резании стали 45

Применяемая СОТС	без СОТС	СОТС 1	СОТС 1 (+)	СОТС 1 (-)	СОТС 2	СОТС 3	СОТС 3 (+)	СОТС 2 (+)	СОТС 3 (-)	СОТС 2 (-)
Угол сдвига $\beta$ , град	11	14	17	17	17	16	19	18	24	28

Из результатов, полученных в ходе исследования следует, что активация полимерсодержащих СОТС коронным разрядом позволяет снизить адгезионное взаимодействие между обрабатываемым и инструментальным материалом. Образование смазочной пленки, описанное в главе 2, позволяет влиять на процесс стружкообразования при резании, уменьшая температуру в контактной зоне, что в свою очередь выражается в повышении угла сдвига, а это ведет к повышению работоспособности режущего инструмента.

На рисунке 4.29 представлены графики, иллюстрирующие распределение микротвёрдости на поверхности стали марки 45 после обработки с применением различных составов СОТС.

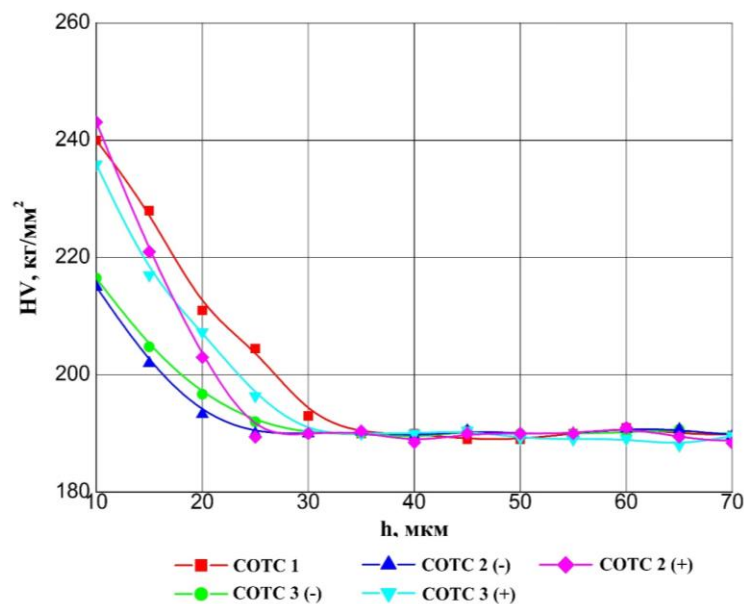


Рисунок 4.29 – Зависимость микротвёрдости стали 45 от глубины деформированного слоя ( $V= 45$  м/мин.,  $S= 0,1$  мм/об)

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что на поверхности материала наблюдается максимальная микротвёрдость, которая постепенно снижается по мере углубления в структуру. В конечном итоге микротвёрдость возвращается к исходному значению, составляющему примерно  $190 \text{ кг/мм}^2$ . По результатам исследования были получены наиболее высокие значения микротвёрдости при обработке без использования СОТС. Эти значения составили  $31\text{--}33 \text{ мкм}$ . На глубине  $10 \text{ мкм}$  микротвёрдость СОТС 1 составляет порядка  $243 \text{ кг/мм}^2$ . Активированные СОТС 2 и СОТС 3 на той же глубине имеют значения микротвёрдости  $HV 215 \text{ кг/мм}^2$ . Минимальные значения глубины деформированного слоя, составляющие  $20\text{--}22 \text{ мкм}$ , достигаются при использовании полимерсодержащих СОТС, активированных отрицательным зарядом. Результаты измерения микротвёрдости стали марки 45 позволяют сделать вывод о том, что внешнее энергетическое воздействие на экспериментальные СОТС улучшает процесс стружкообразования. Это также подтверждается результатами измерения угла сдвига. На рисунке 4.30 представлены зависимости микротвёрдости от глубины деформируемого слоя при резании стали 12Х18Н10Т, что является важным аспектом в анализе механических свойств и поведения материала в процессе резания.

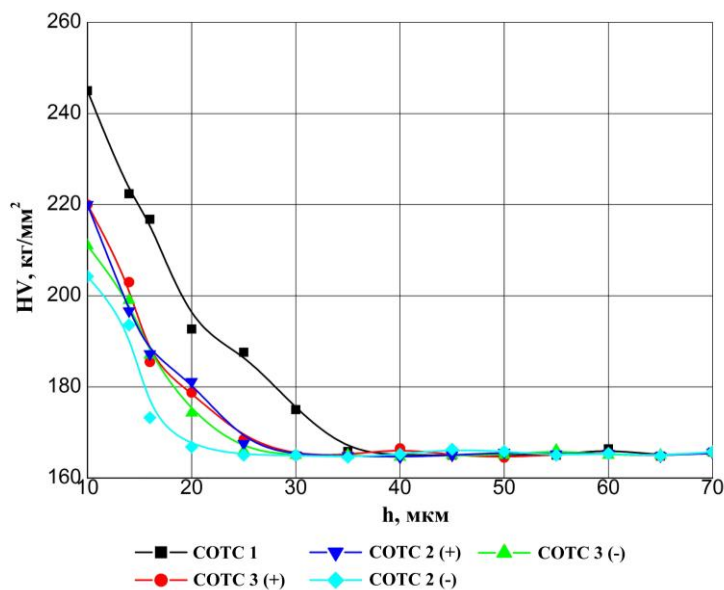


Рисунок 4.30 – Зависимость микротвердости 12Х18Н10Т от глубины деформированного слоя ( $V = 18 \text{ м/мин.}$ ,  $S = 0,1 \text{ мм/об}$ )

Микротвёрдость исходного металла составляет  $165 \text{ кг/мм}^2$ , что указывает на его стандартные характеристики для нержавеющей стали, таких как 12Х18Н10Т, которые известны своей коррозионной стойкостью и высокой прочностью.

Как видно из графиков, при резании с использованием СОТС 1 глубина деформированного слоя составила 43–45 мкм. Эти значения указывают на значительное изменение структуры материала в зоне резания, что может быть связано с высокой температурой и давлением, возникающими в процессе обработки. Применение активированных полимерсодержащих СОТС оказало заметное влияние на микротвёрдость обрабатываемого материала, способствуя её снижению с  $245 \text{ кг/мм}^2$  до диапазона 210–204  $\text{кг/мм}^2$ .

Данное снижение микротвёрдости может быть объяснено изменениями в микроструктуре стали, происходящими в результате воздействия активированных СОТС, которые, вероятно, способствуют улучшению теплоотведения и снижению трения в зоне резания. Это, в свою очередь, может привести к уменьшению механических напряжений и, как следствие, к снижению микротвёрдости.

Минимальная глубина деформированного слоя при использовании активированных СОТС составила 20–25 мкм, что значительно меньше, чем при стандартных условиях резания. Это указывает на то, что применение активированных СОТС позволяет не только улучшить качество обработки, но и уменьшить объем деформируемого слоя, что может быть критически важным для обеспечения работоспособности режущего инструмента.

Положительные результаты были получены при использовании отрицательно активированных СОТС с присадками ПВС и ПЭГ для всех обрабатываемых материалов, в том числе, для титанового сплава ВТ5-1 (рис. 4.31). Применение этих полимеров, вероятно, связано с их способностью улучшать смазочные свойства и уменьшать трение в процессе резания, что способствует более эффективному удалению стружки и охлаждению зоны резания. Отрицательный заряд, создаваемый на коронирующем электроде, может также способствовать улучшению взаимодействия между смазочным материалом

и поверхностью инструмента, что дополнительно уменьшает износ и повышает эффективность резания.

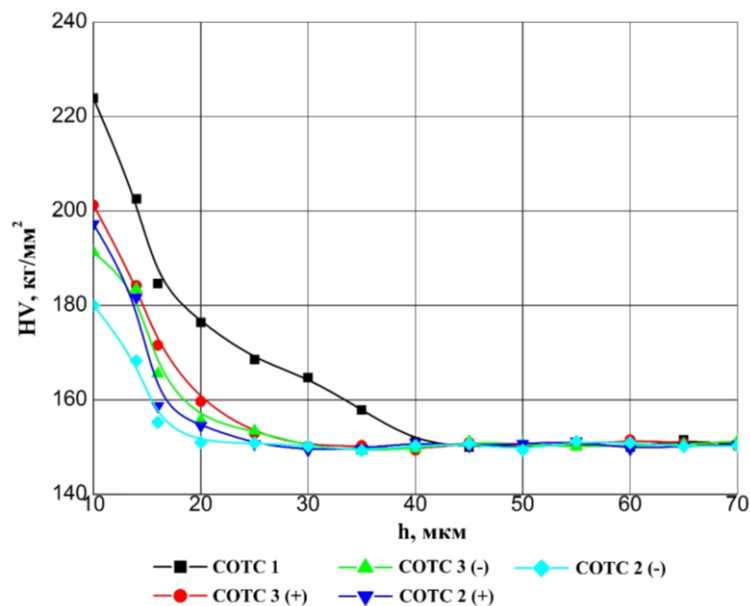


Рисунок 4.31 – Зависимость микротвердости ВТ5-1 от глубины деформированного слоя ( $V = 21$  м/мин.,  $S = 0,1$  мм/об)

Таким образом, результаты данного исследования подчеркивают важность выбора соответствующих СОТС и их компонентов для оптимизации процессов резания, что может привести к улучшению качества обработки, снижению износа инструмента и увеличению производительности.

Из рисунков, представленных выше (рис. 4.29–4.31), можно сделать вывод, что использование активированных СОТС, содержащих полимеры, позволяет снизить микротвёрдость поверхностного слоя обрабатываемой заготовки из обрабатываемого материала. Повышение микротвёрдости и глубины деформированного слоя обусловлено воздействием значительных сил резания и температурными изменениями, происходящими в процессе обработки металлов.

Окончательное состояние поверхностного слоя зависит от баланса процессов упрочнения и разупрочнения, которые определяются преобладанием силового или теплового фактора в зоне резания.

Увеличение продолжительности их воздействия на поверхностный слой приводит к увеличению глубины распространения деформированного слоя [99].

Активированные СОТС с полимерными присадками позволяют уменьшить воздействие перечисленных факторов на обрабатываемую поверхность, посредством образования смазочного слоя (рис. 2.3) из активных частиц, образованных в результате деструкции полимерных присадок, содержащихся в СОТС под действием коронного разряда.

#### 4.7 Изучение остаточных напряжений в поверхностном слое

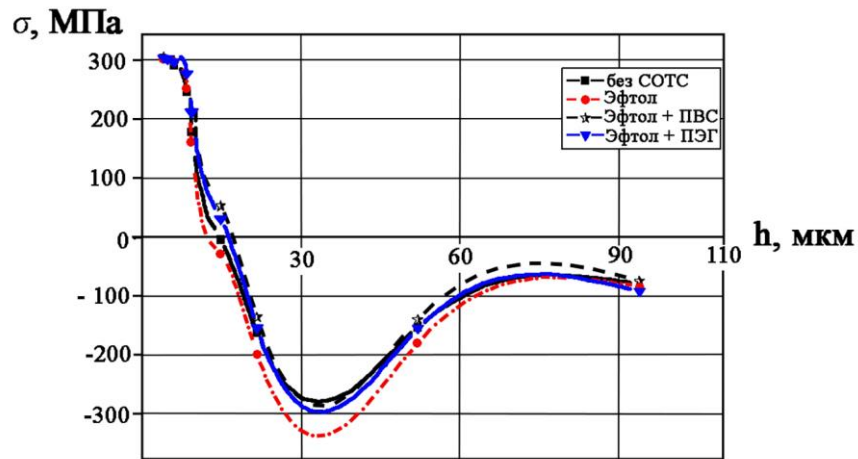
Остаточные напряжения после механической обработки играют важную роль в определении механических свойств и поведения материалов, особенно в поверхностных слоях, где они могут иметь значительное влияние на прочность и долговечность детали.

Основные факторы возникновения остаточных напряжений – пластические деформации и нагревание поверхностных слоев.

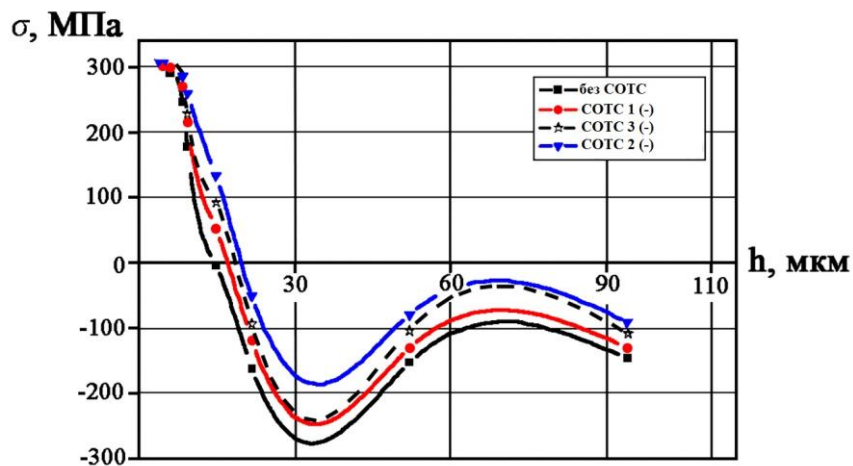
Остаточные напряжения возникают в результате деформации материала в процессе механической обработки, таких как резание, шлифование или полирование. Они могут быть как сжимающими, так и растягивающими, и могут иметь как положительное, так и отрицательное влияние на свойства материала.

В поверхностных слоях, глубиной несколько десятков микрометров, остаточные напряжения могут быть особенно значительными, поскольку именно в этих зонах происходит наибольшая деформация материала в результате механического воздействия. Эти напряжения могут быть вызваны как пластической деформацией, так и упругой деформацией материала, и могут быть связаны с изменением микроструктуры и свойств материала в зоне обработки.

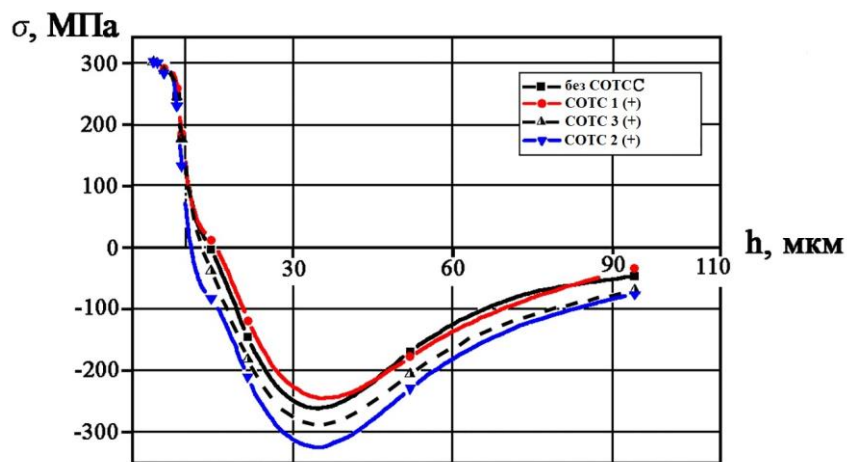
Проведены исследования остаточных напряжений при точении заготовки из стали 45 режущим инструментом Р6М5 ( $\varphi=90^\circ$ ,  $\varphi_1=15^\circ$ ,  $\gamma=20^\circ$ ,  $\alpha=6^\circ$ ,  $\alpha_1=6^\circ$ ). Выбраны следующие параметры резания:  $V = 45$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об,  $t = 0,5$  мм. При обработке точением стали 45 напряжения в поверхностном слое носят сжимающий характер (рис. 4.32).



а



б



в

Рисунок 4.32 – Остаточные напряжения после точения стали 45  
 (а – без активации СОТС, б – отрицательно активированное СОТС,  
 в – положительно активированное СОТС)  
 ( $V = 45$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об.,  $t = 0,5$  мм)

Минимальные остаточные напряжения по всей глубине залегания были зафиксированы после обработки с использованием полимерсодержащего СОТС с отрицательной активацией (рис. 4.32 б). Также было замечено незначительное уменьшение остаточных напряжений при использовании неактивированных полимерсодержащих СОТС.

Наибольшие сжимающие напряжения наблюдались при использовании положительно активированного полимерсодержащего СОТС (рис. 4.32 в).

Экспериментальные исследования в области механической обработки показали, что использование СОТС с отрицательным зарядом на коронирующем электроде может значительно уменьшить остаточные напряжения в поверхностных слоях обрабатываемого материала. Это явление связано с несколькими ключевыми факторами, которые влияют на процесс резания и, в конечном итоге, на качество обрабатываемой детали.

Во-первых, отрицательный заряд на коронирующем электроде способствует образованию активных радикалов в зоне контакта между инструментом и обрабатываемым материалом. Эти радикалы могут взаимодействовать с молекулами СОТС, улучшая их смазочные свойства и снижая трение в зоне резания. Это приводит к уменьшению силы, необходимой для деформации материала, что, в свою очередь, снижает уровень остаточных напряжений, возникающих в результате механического воздействия.

Во-вторых, уменьшение остаточных напряжений также связано с улучшением теплоотведения от зоны резания. Активные радикалы, образующиеся в результате коронного разряда, могут способствовать лучшему распределению тепла и снижению температуры в зоне резания. Высокая температура может способствовать образованию дополнительных остаточных напряжений, особенно в условиях пластической деформации. Таким образом, более эффективное охлаждение и смазка приводят к снижению термических и механических напряжений, что положительно сказывается на прочности и долговечности детали.

С другой стороны, СОТС с положительным зарядом на коронирующем электроде увеличивают остаточные напряжения в процессе резания. Это может быть связано с тем, что положительный заряд создает условия, способствующие образованию более жесткой пленки на поверхности инструмента, что увеличивает трение и, следовательно, требует большего усилия для резания. Увеличение усилия приводит к более высокой степени деформации материала и, как следствие, к накоплению остаточных напряжений, что негативно сказывается на процессе резания и может привести к ухудшению качества поверхности детали. Таким образом, влияние СОТС на остаточные напряжения в процессе резания является сложным и многогранным процессом, зависящим от зарядовой природы коронирующего электрода, свойств используемых полимерных присадок и условий обработки [69].

При обработке заготовки режущим инструментом вытягиваются кристаллические зерна в поверхностном слое металла в сторону резания. В данном случае сказывается трение задней поверхности режущего инструмента. По окончании резания растянутый верхний слой приобретает остаточные напряжения сжатия, а нижние слои – напряжения растяжения.

Немаловажным эффектом, влияющим на остаточные напряжения, является температура. Тепло, выделяемое при резании, вызывает температурные напряжения, результатом которого может быть повышение предела текучести металла. Установка нормальной температуры приводит к деформации сжатия в поверхностных слоях металла.

Отсюда следует, что при резании величина и знак остаточных напряжений будут зависеть от режима обработки. Два фактора, которые возникают при резании – силовой и температурный, направлены в разные стороны. Именно поэтому окончательный результат будет зависеть от фактора, который в данном случае оказывает большее воздействие.

Скорость резания оказывает влияние на тепловое воздействие и силовое. В случае повышения скорости резания происходит повышение температуры поверхностного слоя обрабатываемой заготовки.

В результате чего произойдет превращение сжимающих остаточных напряжений в растягивающие, негативное влияние которых широко известно. Применение активированных полимерсодержащих СОТС позволяет уменьшить величину остаточных напряжений за счет хорошей смазочной способности, образованию активных радикалов в зоне резания, инициирующие химические реакции с образованием на металлических поверхностях смазочных пленок, тем самым, уменьшая адгезионные взаимодействия.

#### 4.8 Исследование вторичных структур методом электронографии

Для выявления структур, сформировавшихся в процессе резания, были проведены дифракционные исследования поверхности стружки. Анализ проводился с использованием электронографического метода. Определение вторичных структур осуществлялось по репликам, снятым с поверхности стружки, полученной при обработке стали 45. Примеры электронограмм с образцов с применением и без применения СОТС представлены на рисунке 4.33.

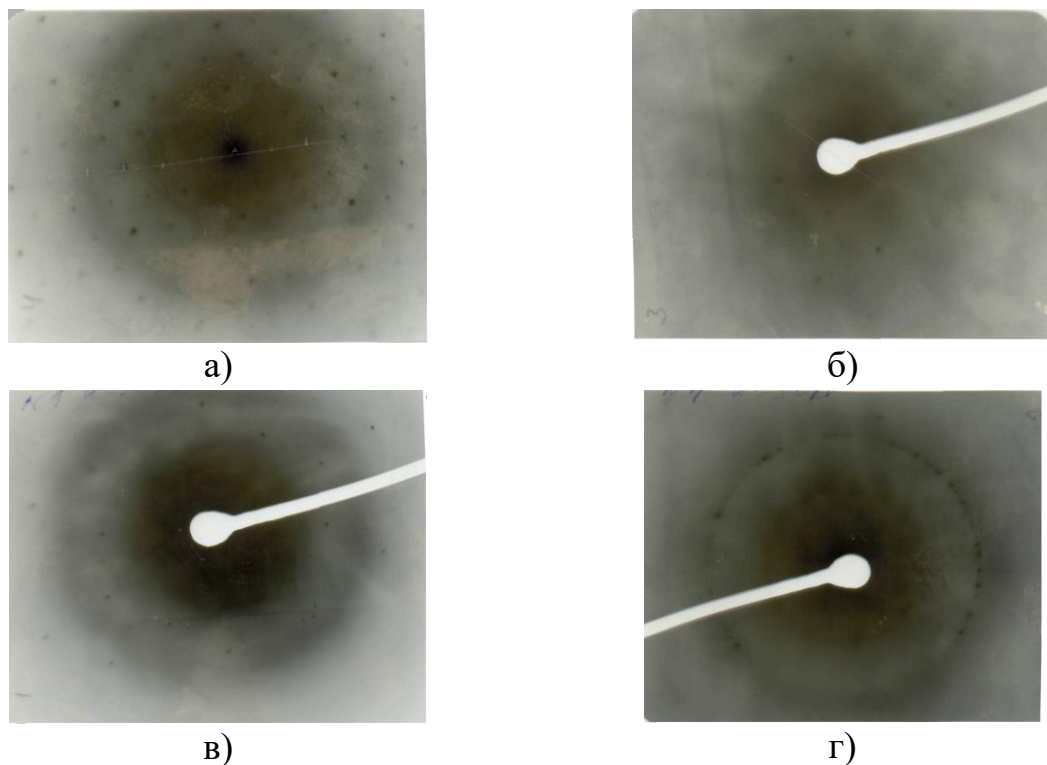


Рисунок 4.33 – Электронограммы исследуемых образцов:  
а – без СОТС; б – СОТС 2; в – СОТС 2 (+); г – СОТС 2 (-)

В результате выполненных расчетов межплоскостных расстояний пленок, формирующихся в процессе резания с применением активированных экспериментальных СОТС, были получены количественные данные, которые представлены в таблице 4.14. Эти данные позволяют оценить влияние активированных СОТС на формирование межплоскостных пленок и их влияние на технологические характеристики процесса резания.

Межплоскостные расстояния представляют собой критический параметр, который влияет на физико-механические свойства образующихся пленок, такие как их прочность, эластичность и адгезионные характеристики.

Эти свойства, в свою очередь, определяют эффективность смазочного материала в процессе резания.

Таблица 4.14 – Значения межплоскостных расстояний структур, образовавшихся на поверхности стружек стали 45 при точении

Справочные значения межплоскостных расстояний				Экспериментальные значения межплоскостных расстояний			
FeO	Fe(OH) <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	Без СОТС	СОТС 2	СОТС 2 (-)	СОТС 2 (+)
d/n	d/n	d/n	d/n	d/n	d/n	d/n	d/n
	4,605		4,85	4,582	4,609		
		3,68		3,534			3,097
			2,956				
	2,821						
						2,712	
2,501		2,51	2,532		2,592		
	2,406		2,527				
			2,524			2,161	
2,166			2,416				
			2,097			1,984	
	1,784						1,789
	1,629	1,60	1,615	1,614	1,697		
			1,614				
1,531	1,536					1,538	
	1,411		1,610				
			1,482		1,437		
1,306	1,349		1,478		1,318		
	1,348						1,347

Продолжение таблицы 4.14

	1,329	1,259		1,287			
1,25		1,104	1,281	1,113		1,280	1,24

В процессе резания с использованием активированных экспериментальных СОТС происходит образование тонких пленок, которые могут значительно варьироваться по своим межплоскостным расстояниям в зависимости от различных факторов, таких как состав СОТС, условия резания, температура и давление. Например, наличие определенных полимерных присадок может способствовать образованию пленок с меньшими межплоскостными расстояниями, что улучшает их адгезию к поверхности инструмента и обрабатываемого материала. Это приводит к снижению трения и повышению эффективности процесса резания.

Полученные значения межплоскостных расстояний также могут быть связаны с механизмами образования активных радикалов в зоне контакта. Эти радикалы, образующиеся в результате коронного разряда, могут изменять структуру и свойства пленок, что, в свою очередь, влияет на их межплоскостные расстояния. Например, активные радикалы могут способствовать кросс-связыванию полимеров, что приводит к образованию более прочных и устойчивых пленок.

При резании без использования СОТС значения соответствовали  $Fe_2O_3$ . При активации СОТС с добавками полимеров сохранялось присутствие оксида  $Fe_2O_3$ , а также наблюдались линии, соответствующие межплоскостным расстояниям  $Fe_3O_4$ ,  $FeO$  и  $Fe(OH)_2$ .

Кроме того, микродифракционное исследование показало, что в результате активации СОТС коронным разрядом образуются новые химические соединения неизвестного состава, отличающиеся от соединений, полученных без применения коронного разряда.

Проводились исследования, направленные на изучение структуры и топографии поверхностей, образующихся при обработке стали 45 режущим инструментом Р6М5.

В ходе исследования были определены изменения внешнего вида поверхностей, возникшие в результате резания с использованием СОТС. Также был изучен вид вторичных структур, образовавшихся в результате физико-химических процессов, протекающих в контактной зоне между компонентами внешней среды и трибосопряжёнными металлическими поверхностями.

Скорость резания составляла 45 м/мин, подача — 0,1 мм/об, глубина резания — 0,5 мм.

Исследования показали, наличие структур, отличающихся от основного материала. Значительное количество таких фрагментов получено при отрицательном знаке на коронирующем электроде.

Предварительная активация СОТС, содержащего полимерные присадки, коронным разрядом, приводит к изменению топографии рассматриваемых поверхностей по сравнению с резанием без активации. Это наблюдалось как при положительном, так и при отрицательном потенциале на коронирующем электроде (рис. 4.34).

Полученные результаты могут быть интерпретированы через механизм деструкции полимера, содержащегося в составе СОТС. Процесс деструкции приводит к фрагментации полимерной матрицы и образованию активных радикалов, которые, попадая в зону контакта во время резания, инициируют ряд химических реакций. Эти реакции, в свою очередь, способствуют формированию различных модификаций оксида железа, что подтверждается расчетами межплоскостных расстояний, представленными в таблице 4.14. Данные модификации могут оказывать значительное влияние на трибологические свойства системы и, следовательно, на эффективность процесса резания.

В процессе трибологического взаимодействия между металлическими поверхностями в зоне контакта происходит формирование новых фаз. Это явление обусловлено физико-химическими реакциями, которые возникают при контакте СОТС или их компонентов с ювенильными металлическими поверхностями. Характерным признаком химического превращения является изменение энергетического запаса реагирующих веществ [65]. В тоже время, в

работах [6, 9, 23] установлено, что оксиды указанные в таблице 4.14 повышают износостойкость режущих инструментов, не смотря на нестабильность образования и существования данных оксидов.

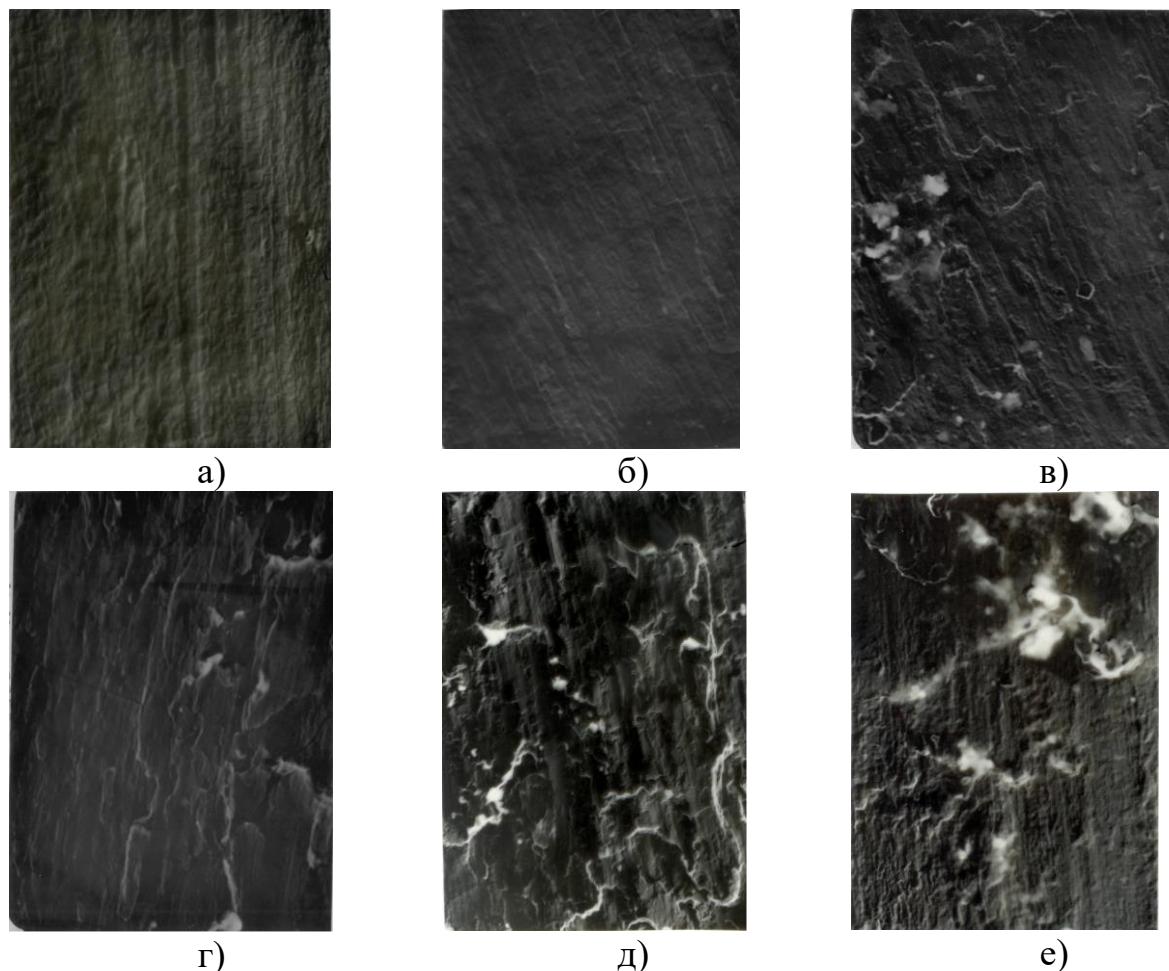


Рисунок 4.34 – Топография поверхности прирезцовой стороны стружки стали 45 после резания с использованием полимерсодержащей СОТС: а – без СОТС; б – Эфтол; в – Эфтол (+); г – Эфтол (-); д – СОТС 2 (+); е – СОТС 2 (-) (увел.× 7500)

Экспериментальные данные о составе и строении защитных пленок, представленные в настоящем параграфе, косвенным образом подтверждает изложенную выше гипотезу о смазочном химическом действии среды и радикально-цепном механизме протекающих реакций.

Чем легче идет процесс образования радикалов (деструкция полимерных присадок), тем сильнее эффективность смазочного химического действия

внешней среды и выше скорость образования защитных пленок и интерметаллоидных химических соединений.

#### **4.9 Исследование термической стабильности кислородсодержащих полимерных присадок**

Возможность образования химически активных частиц в зоне контакта режущего инструмента и обрабатываемого материала при термической деструкции СОТС с кислородсодержащими полимерными присадками изучалась методом синхронного термического анализа, комбинирующего термогравиметрический анализ и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК). Исследование проводили в азотно-кислородной среде (содержание кислорода составляло 21%) и в атмосфере азота (инертная среда). Термическую стабильность в инертной среде исследовали в целях изучения процессов деструкции без учета влияния окислителя. Инертная среда нужна для выявления интервалов термического разложения, в границах которого и происходит «работа» присадки к СОТС, т.к. в процессе резания возможно протекания процесса с содержанием кислорода значительно ниже 21%.

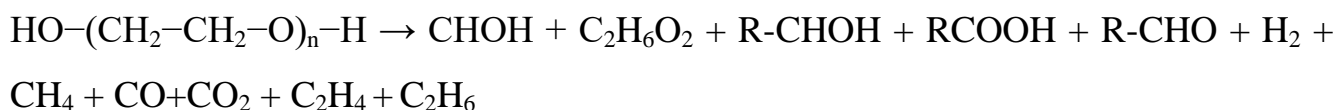
Процесс термического разложения полиэтиленгликоля в атмосфере азота и кислорода (Приложение И, рис. И.1) протекает в диапазоне температур от 175 до 500 °С и включает в себя две стадии.

Первая стадия, происходящая в интервале температур от 175 до 380 °С, сопровождается потерей 89 % образца. На второй стадии термического разложения, происходящей в диапазоне температур от 380 до 475 °С, наблюдается дополнительная потеря 3 % вещества, в результате чего остаётся 8 % исходного материала. Анализ кривой теплового потока выявляет четыре пика: три экзотермических (экзопиков) в диапазоне температур от 150 до 480 °С и один эндотермический (эндопик) в диапазоне от 480 до 800 °С. Суммарная величина экзотермических эффектов составляет 4,6 кДж/г, тогда как тепловой эффект

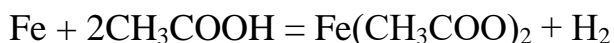
эндопика равен 1,8 кДж/г. Эти данные свидетельствуют о том, что при термическом разложении полиэтиленгликоля преобладает выделение тепловой энергии.

Согласно литературным данным [52] продуктами термического разложения ПЭГ является комплекс различных органических и неорганических веществ: формальдегид, этиленгликоль, спирты, кислоты, альдегиды, кетоны, простые и сложные эфиры, водород, метан, угарный газ и др.

Разложение полиэтиленгликоля можно описать следующей схемой:



Среди выделяющихся веществ органические кислоты (например, уксусная) способны вступать в химическую реакцию с железом, входящего в состав обрабатываемого металла, с образованием оксидных пленок, которые облегчают процесс обработки:



В инертной атмосфере (атмосфере азота) ПЭГ является более термически стабильным (Приложение И, рис. И.2). Термическое разложение ПЭГ начинается значительно позже: при 280 °С (210 °С – в среде с кислородом) и заканчивается при 400 °С. Остаток после термического разложения составил 8 %. На кривой теплового потока наблюдается один эндопик в интервале температур 400-800 °С.

На рисунке 4.35 представлена зависимость потери массы образцов полиэтиленгликоля в азотно-кислородной среде и инертной атмосфере.

Наблюдается, что температура начала термического разложения ПЭГ в инертной среде составляет 300 °С, что значительно выше по сравнению с азотно-кислородной средой, где этот процесс начинается при 200 °С. Завершение термического разложения в инертной среде фиксируется при 400 °С, в то время как в азотно-кислородной атмосфере разложение продолжается до 450 °С. Эти результаты указывают на то, что присутствие кислорода способствует иницированию разложения присадки, сопровождающегося выделением активных частиц, при более низких температурах.

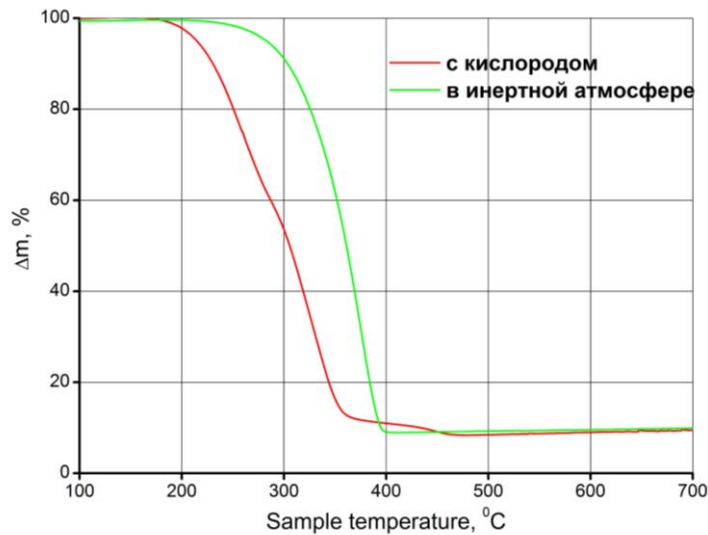


Рисунок 4.35 – Потеря массы полиэтиленгликоля (в %) в азотно-кислородной и инертной средах

Поливиниловый спирт (ПВС) демонстрирует большую термическую стабильность по сравнению с ПЭГ. Процесс термического разложения ПВС начинается при температуре 210 °C и завершается при 520 °C, проходя через две стадии. Первая стадия разложения происходит в диапазоне температур от 190 °C до 390 °C, в ходе которой теряется 51 % массы исходного образца. Вторая стадия протекает в диапазоне от 390 °C до 520 °C, с потерей 37 % массы.

На кривой теплового потока для ПВС наблюдается один широкий экзопик, расположенный в диапазоне от 220 °C до 590 °C, с величиной теплового эффекта равной 15,8 кДж/г (Приложение И, рис. И.3).

В инертной атмосфере (Приложение И, рис. И.4) термическое разложение ПВС происходит в диапазоне температур от 250 °C до 470 °C и также делится на две стадии. Однако в отличие от азотно-кислородной среды, первая стадия в инертной атмосфере протекает в диапазоне от 225 °C до 380 °C с потерей 77,7 % массы, в то время как на второй стадии (от 380 °C до 500 °C) происходит дополнительная потеря 11 % от первоначальной массы.

На кривой теплового потока для ПВС в инертной атмосфере наблюдаются три пика: два эндопика в диапазонах 165–270 °C и 445–800 °C, а также один экзопик в диапазоне 380–490 °C.

Как и в случае с ПЭГ, температура начала термического разложения ПВС в инертной атмосфере составляет 280 °С что выше, чем в азотно-кислородной среде, где разложение начинается при 220 °С (рис. 4.36). Эти данные подчеркивают влияние атмосферы на термическую стабильность и разложение полимеров.

Термическое разложение в инертной среде заканчивается при 400 °С, в то время как в азотно-кислородной – при 450 °С. Таким образом, присутствие кислорода инициирует разложение присадки с выделением активных частиц при более низкой температуре.

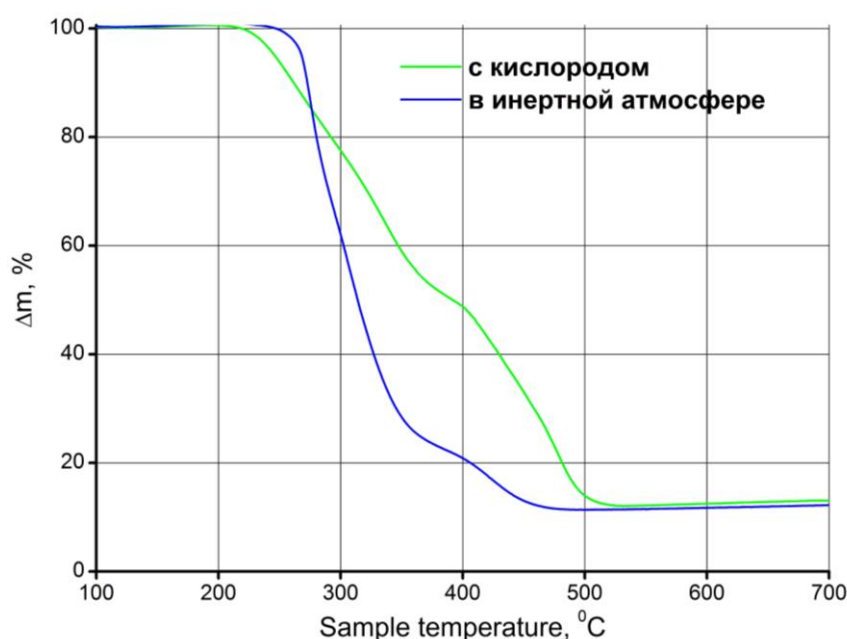


Рисунок 4.36 – Потеря массы поливинилового спирта (в %) в азотно-кислородной и инертной средах

По сравнению с ПЭГ, ПВС проявляет большую термическую стабильность в азотно-кислородной и инертной средах. Соответственно, как компонент СОТС он будет «работать» в более высоком интервале температур, поскольку продукты его термической деструкции, соответственно, будут выделяться при более высоких температурах (уксусная кислота, углекислый газ, вода, спирты, альдегиды и др.) [52].

В кислородсодержащей среде термическое разложение ПЭГ и ПВС начинается при относительно невысокой температуре 180-200 °С. Очевидно, что в

этом случае преимущественно будут образовываться кислородсодержащие соединения. В силу сложного характера данного процесса установить точный качественный и количественный состав составляет трудную задачу. В литературе приводятся сведения, что наиболее часто образуются такие вещества как органические кислоты (в основном уксусная) альдегиды, спирты и др. [52]. Образующиеся кислоты провоцируют окисление обрабатываемого металла (благодаря образованию оксидных пленок). Кроме того, вполне вероятно, что коронный разряд будет индуцировать образование радикалов (в частности,  $O\bullet$ ,  $OH\bullet$ ) из кислородсодержащих продуктов термического разложения ПВХ и ПЭГ. Таким образом, взаимодействие кислородсодержащих продуктов термодеструкции и воздействие коронного разряда оказывают синергетический эффект, что повышает эффективность процесса обработки металлов.

Очевидно, что высокая температура будет возникать в момент контакта инструмента с обрабатываемым материалом и может достигать значений в  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше в точке соприкосновения. Соответственно, термическому разрушению будет подвергаться ПЭГ, находящийся в непосредственной близости от точки контакта. При этом большая часть ПЭГ, находящаяся в СОТС, не будет подвергаться термодеструкции, т.к. не успеет нагреться до необходимых температур.

Наличие в исследуемой системе металла не приводит к изменению общего хода кривой потери массы (Приложение И, рис. И.5). В присутствии металла наблюдается «смещение» точки окончания процесса термического разложения полимерных присадок в сторону более высоких температур на примерно одинаковую величину (ПВХ – на  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ПЭГ – на  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а потеря массы образцов, при этом, уменьшается (Приложение И, рис. И.5).

Наблюдаемое явление можно объяснить образованием оксидов и металлополимерных соединений. Это подтверждается результатами проведенных исследований по изучению вторичных структурных образований на прирезцовой стороне стружки, в результате которых было зафиксировано данных групп веществ (рис. 4.36). Их идентификация не проводилась в виду отсутствия

сравнительных баз данных. Применительно к реальным процессам резания металлополимерные соединения, согласно данным исследователей [54, 61], способны улучшать трибологическую обстановку контактной зоны.

В условиях эксперимента, по всей видимости, образуются комплексы ПЭГ и ПВС с атомами металлов, входящих в состав обрабатываемого материала и инструмента, вызывающие «смещение» кривых потери массы. Таким образом, атомы металла выступают в роли ингибиторов процесса термического разложения присадок, увеличивая тем самым «время их жизни».

В условиях нашего эксперимента, по всей видимости, при термическом разложении образуются комплексы ПЭГ и ПВС и их продуктов термического разложения с атомами металла. На это указывает несимметричность кривых термического разложения соответствующих присадок при добавлении в систему образца металла. При этом, кривые термодеструкции с 2-мя разными образцами металлов (режущий инструмент и обрабатываемый материал) для каждой кислородсодержащей присадки практически одинаковы. Таким образом, по всей видимости, атомы металла выступают в роли ингибиторов процесса термического разложения кислородсодержащих присадок.

Коронный разряд воздействует на «целые» неповрежденные молекулы ПЭГ и ПВС с образованием, согласно схеме протекания цепных реакций (рис. 2.3), радикалов различной природы и состава (кислорода, ОН, СО, СОО и др.), состав которых не поддается точному определению.

В процессе термической деструкции для ПЭГ и ПВС, в интервале температур 200-500 °С, наблюдаются экзотермические пики (Приложение И, рис. И.1 и рис. И.3), т.е. в процессе их разложения выделяется теплота. Очевидно, что выделяющаяся теплота при сравнительно невысоких температурах в зоне резания, в свою очередь, может индуцировать (провоцировать) еще более быстрое разложение компонентов СОТС, что ускоряет образование химически активных частиц в контактной зоне.

Такое поведение вместе с воздействием коронного разряда позволяет получить широкий набор различных активных частиц (активных радикалов, карбоновых кислот), облегчающих металлообработку.

Наличие эндопиков в интервале температур 500-800 °С свидетельствует о поглощении тепла в ходе процессов структурной реорганизации продуктов термического разложения (на структурную реорганизацию указывает отсутствие изменения массы в данной области), что способствует отведению тепла из контактной зоны.

Изучение термической стабильности СОТС имеет важное значение в виду того, что при выполнении ряда технологических операций может находиться слой смазочной пленки. При перемещении стружки относительно передней поверхности режущего инструмента, смазочный слой под влиянием давления и температуры будет подвергаться механическим и термическим нагрузкам. Таким образом, высокая скорость химических реакций в СОТС при выполнении лёгких режимов резания является нежелательной. Напротив, для обработки резанием с высокими скоростями благоприятным является случай, когда скорость термического разложения смазочных веществ высока, поскольку они (или их радикалы) успевают прореагировать со свежими, ювенильными поверхностями стружки.

В связи с этим целесообразно использовать в СОТС химические активные радикалы, которые образуются при разложении смазки. Скорость термического разложения СОТС изучалась с присадками, а также при совместном нагревании с металлами.

#### **4.10 Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения активированного полимерсодержащего СОТС**

Расчет ожидаемого экономического эффекта от внедрения активированного полимерсодержащего СОТС проводился путем сопоставления затрат по базовому

СОТС (Эфтол) и СОТС (Эфтол) с полимерной присадкой ПВС (поливиниловый спирт). Исходные данные, принятые для расчета, а также сам расчет приведены в таблицах 4.15 – 4.17.

Таблица 4.15 – Данные для расчета годового экономического эффекта

№	Символ	Экономический параметр	Эфтол	Эфтол + ПВС
1	T	Срок эксплуатации СОТС до полной замены (мес.)	3	3
2	C <sub>к</sub>	Цена 1т концентрата СОТС (руб.)	45000	75000
3	Q	Объем системы (м <sup>3</sup> )	10	10
4	K	Концентрация рабочей СОТС (%)	5	5
5	M <sub>к1</sub>	Масса первоначальной заливки концентрата СОТС (т)	1	1
6	M <sub>ке</sub>	Масса ежемесячной корректировки эмульсии СОТС (т)	0,5	0,3
7	C <sub>б</sub>	Цена 1т ПВС (руб)		250000
8	M <sub>б1</sub>	Масса первой добавки ПВС в эмульсию СОТС (т)		0,05
9	M <sub>бе</sub>	Масса ежемесячной добавки ПВС (т)		0,02
10	P <sub>п</sub>	Годовой расход твердосплавных режущих пластин (шт.)	5000	3125
11	C <sub>п</sub>	Цена 1 твердосплавной режущей пластины (руб)	250	250
12	C <sub>с</sub>	Стоимость 1 рабочей смены до полной замены СОТС (без учета потерь на остановки производства) (руб)	1000	1000
13	N <sub>е1</sub>	Количество рабочих смен, необходимых для полной замены СОТС	3	3
14	П	Количество полных замен рабочей СОТС в течение года	4	4

$$Z = Z_k + Z_b + Z_p + Z_c$$

Z – затраты; Z<sub>к</sub> – затраты (руб) на приобретение СОТС; Z<sub>б</sub> – затраты (руб) на приобретение ПВС (поливиниловый спирт); Z<sub>п</sub> – затраты (руб) на приобретение твердосплавных режущих пластин; Z<sub>с</sub> – затраты (руб) на полную замену эмульсии СОТС в течение года.

Таблица 4.16 – Расчет объема расходных составляющих

№	Формула расчета	Эфтол		Эфтол + ПВС	
		3	4	5	6
1	$M_k = M_{k1} \times \Pi + 12 M_{ке}$ $M_k$ – годовой расход концентрата СОТС, т	$1 \times 4 + 12 \times 0,5$	10 т	$1 \times 4 + 12 \times 0,3$	7,6 т
2	$M_6 = M_{61} \times \Pi + 12 M_{ке}$ $M_6$ – годовой расход ПВС, т			$0,05 \times 4 + 12 \times 0,02$	0,44 т
3	$N_c = N_{e1} \times \Pi$ $N_c$ – коэффициент трудовых затрат на полную замену эмульсии	$3 \times 4$	12	$3 \times 4$	12

Таблица 4.17 – Расчет объема расходных составляющих (окончание)

№	Формула расчета	Эфтол		Эфтол + ПВС	
		Расчет	Величина затрат в руб.	Расчет	Величина затрат в руб.
1	$Z_k = C_k \times M_k$	$45000 \times 10$	450000	$75000 \times 7,6$	570000
2	$Z_6 = C_6 \times M_6$			$250000 \times 0,44$	110000
3	$Z_{п} = C_{п} \times P_{п}$	$250 \times 5000$	1250000	$250 \times 3125$	781250
4	$Z_c = C_c \times N_c$	$1000 \times 12$	12000	$1000 \times 12$	12000
5	Итого затраты $Z = Z_k + Z_6 + Z_{п} + Z_c$		1712000		1473250
Итого: 1712000 руб.-1473250руб.=283750 руб.					

С учетом вышеперечисленных затрат годовой ожидаемый экономический эффект от внедрения технологии охлаждения и смазки составил 283750 рублей.

#### Выводы по главе 4

1. Установлен положительный эффект влияния исследуемых СОТС с полимерными присадками на период стойкости режущего инструмента и шероховатость обработанных поверхностей. При обработке заготовки из стали 45 инструментом из быстрорежущей стали Р6М5 период стойкости увеличился в 1,5

раза. Период стойкости инструмента из твердого сплава ВК60М при скорости резания 100 м/мин для базового СОТС составил 31 минуту, для СОТС с присадкой ПЭГ – 76 минут, для СОТС с присадкой ПВС – 106 минут.

2. По результатам проведенных исследований были получены регрессионные уравнения, устанавливающие зависимость влияния концентрации, а также предварительной активации кислородсодержащих полимерных присадок на период стойкости режущего инструмента. Анализ полученных регрессионных уравнений позволил получить рациональные составы исследуемых СОТС.

3. Установлено, что при обработке различных материалов с применением отрицательного заряда на коронирующем электроде, и использовании присадки ПВС достигается максимальная износостойкость режущего инструмента при этом износостойкость инструмента увеличилась в два раза по сравнению с базовой СОТС.

4. Результаты экспериментальных исследований при сверлении показали, что кислородсодержащие полимерные добавки оказывают положительное влияние на процесс резания, в частности применение этих СОТС привело к снижению крутящего момента в среднем на 30%.

5. По результатам металлографических исследований установлено, что условный угол сдвига при резании с СОТС с присадками полимеров увеличивается, это объясняется уменьшением силы трения между стружкой и резцом, что приводит к снижению составляющих усилий резания и энергозатрат на удаление данного объема материала.

6. Результаты, полученные в ходе исследования микротвёрдости обрабатываемых материалов, позволили установить, что активированные полимерсодержащие СОТС оказывают более благоприятное воздействие на процесс стружкообразования по сравнению с неактивированными в связи с особенностями пластифицирующих явлений в контактной зоне. При этом применение активированных полимерсодержащих СОТС способствовало снижению микротвёрдости на 20%, а глубины деформированного слоя — до 50%.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

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, коррозионностойких сталей на промышленных предприятиях АО УАП «Гидравлика» (г.Уфа), АО «ЛТЗ» (г. Людиново), АО «МК Витязь» (г. Ишимбай), ОАО «ИВХИМПРОМ» (г. Иваново) (Приложение А).

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. SU 1572016 A1 СССР, С 10М 145/14. Смазочно-охлаждающее технологическое средство для обработки металлов резанием / Н.А. Можин, В.В. Васильев - №4458549/04; заявл. 11.07.88, опубл. 15.08.94.
2. А.с. 709668 СССР, С 10 М 3/02. Смазочная охлаждающая жидкость для механической обработки металлов / Н.А. Можин, В.Н. Латышев, Р.И. Карабанов. - №2563510/23-04; заявл. 03.01.78, опубл.15.01.80, Бюл. № 2 – 3 с.
3. Абдулгасис, Д.У. Анализ методов активации СОТС при обработке металлов резанием / Д.У. Абдулгасис, У.А. Абдулгасис, Э.Э. Ягьяев, Э.Д. Умеров // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2013. – № 38. – С. 46-50.
4. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение / А.А. Абрамзон. – Л.: Химия, 1981. – 302 с.
5. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Марков, Ю.В. Грановский. – М. : Изд-во Наука, 1976. – 279 с.
6. Ахметзянов, И.Д. Использование электронно-ионной технологии для повышения эффективной обработки резанием / И.Д. Ахметзянов, В.В. Бедункевич, И.П. Верещагин, В.И. Ильин // Электрокаплеструйная технология и реализация программы «Интенсификация-90»: Материалы семинара. Ленинград. – 1989. – С. 43 – 47.
7. Ахметзянов, И.Д. Влияние униполярного коронного разряда на процесс обработки резанием / И.Д. Ахметзянов, В.И. Ильин // Чебоксары: Изд-во ЧувГУ, 1987. – С. 132 - 139.
8. Ахметзянов, И.Д. Решение задачи академика Н.Н. Семенова о поиске новых смазочно-охлаждающих технологических средств (на примере сухого электростатического охлаждения) / И.Д. Ахметзянов //

Металлообработка. – 2006, № 4. – С. 2-6.

9. Ахметзянов, И.Д. Возможности и условия применения метода СЭО при резании металлов / И.Д. Ахметзянов, В.В. Бедункевич, В.И. Ильин, С.И. Ляпунов // Приборы и системы управления. – 1991. – №5. – С. 40-41.
10. Берлинер, Э.М. Эффективность смазочно-охлаждающих жидкостей с химически активными элементами//Станки и инструменты. 2000. №3. С.33-35.
11. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975.
12. Богданович, П.Н. Анализ противозадирных и антифрикционных свойств пластичных смазочных материалов / П.Н. Богданович, А.В. Янчилик, А.В. Ивахник // Трение и износ. – 2012. – № 5(33). – С. 493-499.
13. Болога, М.К. Электроконвекция и теплообмен / М.К. Болога, Ф.П. Гросу, И.А. Кожухарь; Под ред. Г.А. Остроумова; АН МССР, Ин-т прикл. физики. – Кишинев : Штиинца, 1977. – 320 с.
14. Борисов, И.А. Исследование смазочного действия внешней среды / И.А. Борисов // Вопросы теории действия СОЖ в процессах обработки металлов резанием. – 1975. – С. 13-34.
15. Борисов, И.А. Исследование смазочного действия внешней среды на процесс резания металлов : автореф. дис. ... канд. техн. Наук / И.А. Борисов // Горький: Изд-во Горьк. политехн. ин-т им. А.А. Жданова, 1971. – 24 с.
16. Буяновский, И.А. Граничная смазка адсорбционным слоем / И.А. Буяновский // Трение и износ. – 2010. – № 1(31). – С. 48-67.
17. Валиева, А.Ф. Кинетика и механизм окисления поливинилового спирта в водной среде: дис. ... канд. хим. наук: 02.00.04 / Валиева Альбина Фанилевна. – Уфа, 2007. – 152 с.
18. Ватагин, Ю.М. Методика оценки эффективности действия СОЖ при резании металлов / Ю.М. Ватагин // Ученые записки ИвПИ. – 1973, т 103, вып.4. – С 17-22.

19. Верещака, А.С. Исследование теплового состояния режущих инструментов с помощью многопозиционных термоиндикаторов / А.С. Верещака, М.В. Провоторов, В.В. Кузин, [и др.] // Вестник машиностроения. – 1986, №1. – С. 45-49.
20. Внуков, Ю.Н. Повышение износостойкости быстрорежущих инструментов на основе исследования их трения с обрабатываемыми материалами и реализации новых технологических возможностей: дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. – Москва, 1992. – 371 с.
21. Гордон, М.Б. Условия контактного взаимодействия как база создания СОЖ со специальными свойствами при резании металлов / М.Б. Гордон, А.В. Никифоров // Вопросы теории действия СОТС в процессах обработки металлов резанием. – 1975.
22. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Высшая школа, 1985. – 304с.
23. Грудев, А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
24. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов: Справочник / Я.Л. Гуревич М.В. Горохов В.И. Захаров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986, – 240 с.
25. Евдокимов, Ю.А. Влияние полимерных присадок на противозадирные свойства смазочных масел / Ю.А. Евдокимов, Е.З. Мазяр, С.С. Санчес, Н.А. Сухоруков // Вестник машиностроения – 1973. – №9. – С. 39-41.
26. Евдокимов, Ю.А. Применение полимерных материалов в узлах трения / Ю. А. Евдокимов // Применен, полимерн. матер. в с/х машинах : Докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – Минск, 1973.
27. Загоруйко, Н.И. Применение модифицированного масла в качестве СОЖ / Н.И. Загоруйко, В.П. Баранин // Станки и инструмент. – 1970. – № 8.
28. Заславский, Р.Н Перспективы использования трибополимеробразующих соединений для создания смазочных материалов / Р.Н. Заславский // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – № 3.

29. Заславский, Ю.С. О некоторых перспективных направлениях использования веществ, образующих полимеры трения / Ю.С. Заславский // Химия и технология топлив и масел. – 1973. – № 9. – С.45-48.
30. Заславский, Ю.С. Влияние веществ, образующих полимеры трения на противоизносные, противозадирные, антифрикционные и моющие свойства масел Ю.С. Заславский // Химия и технология топлив и масел. – 1974. – № 1.
31. Зимин, Ю.С. Окисление поливинилового спирта в водной среде. II. Кинетическая схема процесса / Ю. С. Зимин, А. Ф. Агеева, И. М. Борисов, Ю. Б. Монаков // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49, № 2. – С. 58-62.
32. Злотников, И.И., Экспериментальные исследования трибологических явлений при резании материалов / И.И. Злотников, Ю.М. Плескачевский // Трение и износ. – 2006. – т. 27, №3. – С. 318-329.
33. Кабалдин, Ю.Г. Моделирование контактного взаимодействия стружки с инструментом на основе квантово-механических расчетов / Ю.Г. Кабалдин, О.В. Кретинин, И.Л. Лаптев [и др.] // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2014. – Т. 2, № 2. – С. 51-56.
34. Кабалдин, Ю.Г. Наноструктурные процессы и самоорганизация при резании / Ю.Г. Кабалдин, А.А. Просолович, Е.Г. Колыхалова, А.А. Уткин // Вестник машиностроения. – 2011. – № 3. – С. 39-46.
35. Капаева, С.Д. Стойкость токарных резцов при использовании водорастворимой полимерной СОЖ: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 – Республика Казахстан, Алматы, 2008.
36. Канаев, А.А. Влияние адсорбционно-активных сред на пластифицирование поверхностного слоя металлов при граничном трении / А.А. Канаев // Сб. Вопросы теории трения, смазки и обрабатываемости металлов. – Чебоксары, 1973.
37. Кацев, П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента / П.Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1974. – 231 с.

38. Кирейнов, А.В. Современные тенденции применения смазочно-охлаждающих технологических средств при лезвийной обработке труднообрабатываемых материалов / А.В. Кирейнов, В.Б. Есов // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2017. – № 2(62). – С. 5. – DOI 10.18698/2308-6033-2017-2-1591.
39. Кириллов, А. К. Разработка и исследование технологии сухого резания труднообрабатываемых материалов с компенсацией физических функций СОТС / А. К. Кириллов, А. С. Верещака, А. А. Козлов, З. Ю. Робакидзе // СТИН. – 2009. – № 1. – С. 35-40.
40. Климов, К.И. Химическая стабильность смазочных материалов в зоне трения подшипников качения / К.И. Климов, М.В. Морозова, В.М. Мартынов, Е.М. Никоноров // Химия и технология топлив и масел. —1973. — №9. — С. 56—59.
41. Клушин, М.И. К характеристике контактного взаимодействия стружки с инструментом / М.И. Клушин, М.С. Бенкер, М.Б. Гордон, // Сб.№3 Вопросы теории СОТС в процессах обработки металлов резанием. – Горький, 1975. – С.54-66.
42. Ковалев, В.Г. К электродиффузионному износу / В.Г. Ковалев, С.В. Ковалев // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон.журн. 2012. № 12. С. 39-46. DOI: 10.7463/1212.0486388
43. Корнев, В.И. О влиянии силиконовых жидкостей на антифрикционные свойства минеральных масел / В.А. Корнев, В.М. Виленский // Вестник РГУПС– 2000. – №3. – С. 21-24.
44. Кушнер, В.С. Изнашивание режущих инструментов и рациональные режимы резания: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1998.
45. Кушнер, В.С. Основы стружкообразования. Кн.2: Теплофизика и термомеханика резания: Учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 1996.
46. Латышев, В.Н. Повышение эффективности СОЖ / В.Н. Латышев. – М.: Машиностроение, 1975. – 88 с.

47. Латышев, В.Н. О механизме действия внешней среды при резании металлов / В.Н. Латышев // Ученые записки ИГПИ, т.103, вып.4. Вопросы техники и технологии. – Иваново, 1973.
48. Латышев, В.Н. Исследование механо-химических процессов и эффективности применения смазочных сред при трении и обработке металлов: автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.17.14 – Москва, 1973.
49. Латышев, В.Н. О смазочном действии внешней среды при резании металлов и научно-технических основах синтеза СОЖ / В.Н. Латышев // Сб. Вопросы обработки металлов резания. – Иваново, 1973.
50. Латышев, В.Н. Трибология резания / В. Н. Латышев. - Иваново : ИвГУ. Кн. 1 : Фрикционные процессы при резании металлов. - 2009. - 108 с.
51. Латышев, В.Н. Экспериментальные исследования трибологических явлений при резании материалов / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, В.С. Раднюк [и др.] // Трение и износ. – 2010. – т. 31, №5. – С. 500-510.
52. Мадорский, С. Термическое разложение полимеров // М. – Мир. – 1967. – С. 328.
53. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания // М. – Машиностроение. – 1976. – 278 с.
54. Макаров, Р.В. Применение полимерсодержащих СОЖ при резании сталей / Р.В. Макаров, А.И. Промптов, В.З. Анненкова [и др.] // Вестник машиностроения. -1986. № 9, - С. 45-46.
55. Полянсков, Ю.В. Механизм магнитной и ультразвуковой активации СОЖ при шлифовании кругами из сверхтвердых материалов / Л.В. Худобин, А.Л. Глузман, М.А. Крайнова // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием : тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. совещ. – Горький : ГПИ, 1975. – Вып. 2. – С. 128-146.
56. Мигранов, М.Ш. О механизме действия кислородсодержащих полимерных присадок, активированных коронным разрядом, при резании металлов / М.Ш. Мигранов, Д.С. Репин, С.А. Сырбу [и др.] // Сборка в

- машиностроении, приборостроении. 2023. № 8. С. 381-384. – DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-8-381-384.
57. 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 [и др.] // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 6. – С. 271-275.
58. Мигранов, М.Ш. Повышение износостойкости инструментов на основе прогнозирования процессов адаптации поверхностей трения при резании металлов : дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01. – Москва, 2007. – 433 с.
59. Мигранов, М.Ш. Применение сухого электростатического охлаждения при резании труднообрабатываемых материалов / М.Ш. Мигранов, А.М. Мигранов, В.Р. Мухамадеев [и др.] // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2018. – Т. 22, № 4(82). – С. 12-18.
60. Мигранов, М.Ш. Термодинамический анализ контактных процессов при резании металлов / М.Ш. Мигранов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – № 2-4(292). – С. 40-46.
61. Можин, Н.А. О регулировании химической активности СОЖ / Н.А. Можин, В.Н. Латышев // Вопросы обработки металлов резанием. Сборник научных работ. Иваново, Иван. гос. энергетич. ин-т. 1975. – С. 26-31.
62. Можин, Н.А. Исследование механизма и эффективности действия СОЖ с иницирующими и полимерными присадками при внутреннем резбонарезании в нержавеющей сталях и титановых сплавах: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Иваново, 1973.
63. Морозов, О.В. Энергетический подход к вопросу о трении и износе / О. В. Морозов // Известия ТРТУ. – 1997. – № 2(5). – С. 198-199.
64. Наумов, А.Г. Влияние ювенильных поверхностей на процесс образования

- смазочных пленок при лезвийном резании металлов / А.Г. Наумов, М.П. Пагин, К.В. Курапов // *Металлообработка*. – 2009, № 6 (54). – С. 8-13.
65. Наумов, А.Г. Развитие теории радикально-цепного механизма действия СОТС при резании металлов / А.Г. Наумов, В.Н. Латышев, В.С. Раднюк [и др.] // *Металлообработка*, 2016. – Вып. 4(94). – С. 26-33.
66. Никифоров, М.Б. Контактные явления и действия СОЖ при тяжелых режимах резания / М.Б. Никифоров, М.Б. Гордон // *Вопросы теории трения, смазки и обрабатываемости металлов*. – Чебоксары, 1973. – С. 22.
67. Пат. 2287419 РФ. Устройство для получения ионизированных и озонированных СОТС / В.Н. Латышев, А.Г. Наумов, Л.И. Минеев, А.Н. Прибылов, И.Н. Пименов, Н.А. Демьяновский. – № 2287419; заявлено 21.05.; опублик., Бюл. № 4. – 2с.
68. Подзолков, А.И. Влияние полимерсодержащих смазочно – охлаждающих технологических средств на эффективность резания металлов / А.И. Подзолков, Ю.А. Дубовик, Д.А. Бабенко // *Вестник ХНТУ*. – 2007. – № 3(29). – С. 184-189.
69. Подураев, В.Н. Механическая обработка с охлаждением ионизированным воздухом / В.Н. Подураев, А.С. Татаринев, В.Д. Петрова // *Вестн. машиностроения*. – 1991. – №11. – С. 27 – 31.
70. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: Учеб. руководство для вузов – 2-е изд, перераб и доп – М.: Наука. Гл. ред. физ. – мат. лит., 1992 – 536 с.
71. Ребиндер, П.А. Обзорные доклады по теме: Взаимодействие поверхностей адгезия и деформация поверхностных слоев при трении / П.А. Ребиндер, Р.Н. Куртель // *Всесоюз. симпозиум о природе твердых тел*. Минск: Наука и техника. – 1969. – С. 39.
72. Режимы резания металлов: Справочник / Ю.В. Барановский, Л.А. Брахман и др. – М.: НИИТавтопром, 1995. – 456 с.
73. Резников, А.Н. Тепловые процессы в технологических системах. / А.Н. Резников, Л.А. Резников М.: Машиностроение, 1990. - 288 с.
74. Репин, Д.С. Изучение взаимодействия кислородсодержащих полимерных

- присадок к СОТС с поверхностью металлов / Д.С. Репин, С.А. Шабунин, В.Б. Бубнов, Е.В. Зарубина // Пожарная и аварийная безопасность. – 2024. – № 3(34). – С. 113-121.
75. Репин, Д.С. О некоторых аспектах применения активированных коронным разрядом полимерсодержащих СОТС при обработке металлов резанием / Д. С. Репин, [и др.] // Металлообработка. – 2022. – № 1(127). – С. 3-10. – DOI 10.25960/мо.2022.1.3.
76. 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.
77. Репин, Д.С. Применение полимерсодержащих СОТС при резании металлов / Д.С. Репин // Техника и технологии трибологических исследований: сб. статей IV междун. науч.-практич. конф. – Иваново, 2015. – С. 60-65.
78. Репин, Д.С. Влияние активированных полимерсодержащих СОТС при обработке металлов резанием / Д.С. Репин, В.Н. Латышев, А.Г. Наумов // Металлообработка. – 2011 № 4 (64). С. 2-4.
79. Репин, Д.С. Некоторые результаты применения кислородсодержащих полимерных присадок к СОТС активированных коронным разрядом при механической обработке металлов резанием / Д.С. Репин, А.Г. Наумов, В.Б. Бубнов [и др.] // Пожарная и аварийная безопасность. – 2022. – № 4(27). – С. 65-72.
80. Рыжкин, А.А. Об электрических явлениях при трении / А.А. Рыжкин, В.Э. Бурлакова // Вестник ДГТУ. – 2011. Т 11 (9), - С. 1564-1573.
81. Сеницын, В.В. Подбор и применение пластичных смазок / В.В. Сеницын. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
82. Смирнов, Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме / Б.М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1974. – 456 с.
83. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки

- металлов резанием : справочник / под ред. Энтелиса С.Г., Берлинера Э.М. – М.: Машиностроение, 1995. – 496 с.
84. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Л.В. Худобин, А.П. Бабичев, Е.М. Булыжев и др. / Под общ. ред. Л.В. Худобина. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.; ил. – ISBN 5-217-03328-2.
85. Солодихин, А.Е. Влияние электростатического состояния воздушной среды на процесс точения стали // Электронная обработка материалов. 1972. № 3. С. 15 – 19.
86. Солоненко, Л.А. Модификация поверхностного натяжения СОЖ присадками из полифункциональных производных органических кислот С3-С4 / Л.А. Солоненко, М.А. Тлехусеж, Л.Н. Сороцкая // Фундаментальные исследования. – 2008. – № 7. – С. 54-56.
87. Сошко, А.И. Механическая обработка металлов / А.И. Сошко // Полимеры в технологических процессах обработки металлов. – Киев: -Наук., думка, 1977. – С. 7-15.
88. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
89. Татарникова, С.Р. Смазочно-охлаждающие жидкости на основе водорастворимых полимеров как средство повышения эффективности процесса резания: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Татарникова Светлана Ростиславовна. – Иркутск, 1999. – 186 с.
90. Тахман, С.И. Связь характеристик износостойкости режущего клина с параметрами рабочего состояния его поверхностей / С.И. Тахман // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2005. – № 2. – С. 99-106.
91. Термически стимулированные фазовые превращения дисперсного диоксида титана / А.С. Чернов, Ю.М. Коштыл, А.А. Малков, А.А. Малыгин // Известия СПбГТИ (ТУ). 2012. № 15 (41). С. 46 - 49.

92. Трение, изнашивание и смазка: Справочник. В 2-х кн. / Под ред. И.В. Крагельского, В.В.Алишина. - М.: Машиностроение, 1978, кн..1,2. - 400 с, 358 с.
93. Трент, М.Е. Резание металлов / М.Е. Трент. – М.: Машиностроение, 1980. - 263 с.
94. Хайнике, Г. Трибохимия: Пер. с англ. / Г. Хайнике. – М.: Мир, 1987. – 584 с.
95. Хаустова, О.Ю. Повышение работоспособности твердосплавного инструмента и качества обработанных поверхностей при сухом резании различных конструкционных материалов : дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01 / Хаустова Ольга Юрьевна. – Москва, 2004. – 181 с.
96. Химическая энциклопедия: в 5-ти т.: т 3: Меди/Полимерные/Редкол.: Кнунянц И. Л. (гл. ред. ) и др. – М.: Большая Российская. энцикл. , 1992. – 639 с.
97. Холмберг, К. Поверхностно-активные вещества и полимеры в водных растворах. Перевод с английского канд. хим. наук Ямпольского Г.П. / К. Холмберг, Б. Йёнссон, Б. Кронберг. – М., Бином. Лаборатория знаний, 2007. – 530 с.
98. Чекалова, Е.А. Механическая обработка с применением активированного воздуха / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // Известия МГТУ МАМИ. – 2012. – Т. 2. – № 2(14). – С. 213-216.
99. Ящерицын, П.И. Теория резания: учеб./ П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич. – 2-е изд., испр. и доп. –Мн.: Новое знание, 2006. – 512с. : ил.– ISBN 985-475-195-3.
100. Brinksmeier, E. Metalworking fluids - Mechanisms and performance / E. Brinksmeier, D. Meyer, A. G. Huesmann-Cordes, C. Herrmann // CIRP Annals - Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 64, No. 2. – P. 605-628. – DOI 10.1016/j.cirp.2015.05.003.
101. Bruckner, C.F. Oxygen Chemisorption And Reaction on a-Fe(100) Using Photoemission and Low-energy Electron Diffraction Surface Science /

- C.F. Bruckner, T.N. Rhodin 57 // (1976), pp. 523-539.
102. Doyle, E. Adhesion in metal cutting: anomalies associated with oxygen / E. Doyle, J. Horne // *Wear*. 1980. P. 383 - 391.
  103. Junhui, Ma. An Evaluation of the Tribological Behavior of Cutting Fluid Additives on Aluminum-Manganese Alloys. / Ma Junhui, A. Olufisayo, Gali and Reza A. Riahi // *Lubricants* 2021, 9, 84.
  104. Junhui, Ma. An investigation into cutting fluid additives performance during machining processing of Ti-6Al-4V / Ma Junhui, Mohammadi Javad, Yan Zhou, Jeff Larsh, Kris Januszkiewicz, Robert Evans, Yixing Zhao, Olufisayo A. Gali, A.R. Riahi // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2021. 112(3-4):1-11.
  105. Klocke, F. Coated Tools for Metal Cutting – Features and Applications / F. Klocke, T. Kreig // *Annals of CIRP*, 1999. V. 48. № 2. P. 515-525.
  106. Cherrington, B.E. Gaseous Electronics and Gas Laser / B.E. Cherrington // Pergamon Press. Oxford, N.Y.– 1982. – P. 112-117.
  107. Sheinin, V.B. Protonation Equilibriums of Porphin, 5,10,15,20-Tetraphenylporphin, 5,10,15,20-Tetrakis(4'-sulfonatophenyl)porphin in Methanol / V.B. Sheinin, S.A. Shabunin, E.V. Bobritskaya, T.A. Ageeva, O.I. Koifman // *Macroheterocycles*. - 2012. - V. 5. – P. 252-259.
  108. Spectroscopic ellipsometry of thin film and bulk anatase (TiO<sub>2</sub>) / Jr. Jellison et al // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. № 12. P. 9537 - 9541.
  109. T.Smith, Y.Naerheim, M.S.Lan *Tribology International* Volume 21, Issue 5, October 1988, Pages 239-247.
  110. Zaslavsky, Yu.S. et al. Antiwear, extreme pressure and antifriction action of friction polymer formation additives // *Wear*. 1972 Vol.20. P. 287-297.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Акты внедрения

	<b>ВИТЯЗЬ</b>	
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ КОМПАНИЯ «ВИТЯЗЬ» (АО «МК «ВИТЯЗЬ»)		
Шоссе Индустриальное, 2, г. Ишимбай, Республика Башкортостан, 453203, Телефон (34794) 2-47-87, Факс (34794) 2-68-38, E-mail: vityazh@vtz.uvz.ru, www.bolotohod.ru ОКПО 77849349, ОГРН 1050202782277, ИНН/КПП 0261013879/026101001		

27.02.2024 № 167 -0-2024  
 На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор технический  
 Акционерного общества  
 «Машиностроительная компания  
 «Витязь»




«27» 02 2024 г.

## АКТ

## Производственного внедрения

**активированного коронным разрядом смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) с полимерной присадкой поливиниловый спирт (ПВС) для лезвийной обработки резанием**

Комиссия в составе: от МК «Витязь»: заместитель главного технолога Гонягин А.С.; начальник инструментального производства Фаткуллин И.Р.; начальник инструментального отдела Маямсин С.А. и от ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» - аспирант Репин Д.С. (разработчик технологии получения и применения СОТС); д.т.н., профессор Мигранов М.Ш., к.т.н., доцент Митрофанов А.П. по результатам производственной апробации и эксплуатационных испытаний в период с 11.01.2024 г. по 28.02.2024 г. при продольном точении и резьбонарезании токарными резцами марки ВК6 ОМ сталей и сплавов используемых в производстве основных деталей, составила настоящий акт.

1. Цель проведения производственной апробации: повышение производительности и эффективности лезвийной обработки резанием за счет увеличения периода стойкости режущего инструмента при улучшении показателей качества обработанной поверхности на производственной площадке МК «Витязь» на операциях продольного точения с использованием активированного СОТС («Эфтол») с полимерной присадкой (ПВС). По результатам производственной апробации и эксплуатационных экспериментальных испытаний принято решения о целесообразности внедрения активированного СОТС с полимерной присадкой в МК «Витязь» на операциях токарной обработки и резьбонарезания.

2. Условия проведения производственной апробации.  
*Режущий инструмент и обрабатываемый материал*

Державка токарная CRSNR 3232P 19 для наружного точения четырехгранными твердосплавными пластинами ВК6 ОМ (10x10 мм) и твердосплавных для резьбонарезания на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ сталей и сплавов, используемых при изготовлении валов и деталей, работающих при повышенных температурах.

*Режим резания и станочное оборудование*

Эксплуатационные испытания проводились на операции продольного точения на следующих режимах – для поделочных сталей: скорость резания  $V = 160$  м/мин, подача

$S=0,11$  мм/об, глубина резания  $t=0,5$  мм и для нержавеющей стали: скорость резания  $V=110$  м/мин, подача  $S=0,11$  мм/об, глубина резания  $t=0,5$  мм. В качестве станочного оборудования использовался токарный станок 16Ф20Ф3С47 с ЧПУ. Измерение величины фаски износа по задней поверхности исследуемых пластин проводились на оптическом электронном инструментальном микроскопе. Измерения осуществлялись по истечении каждых 5 минут эксплуатации пластин. Полученные данные записывались в таблицы испытаний.

### 3. Результаты проведения производственной апробации.

Результаты проведенных эксплуатационных испытаний твердосплавных пластин при продольном точении и наружном резьбонарезании ответственных деталей агрегатов с использованием активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС) подтвердили возможность повышения производительности обработки в среднем на 24 – 32 % за счет увеличения периода стойкости инструмента при обеспечении требуемых показателей качества обработанной поверхности.

### 4. Заключение.

Проведенные производственные испытания и экспериментально установленные данные позволяют сделать заключение о значительном повышении периода стойкости инструмента с использованием активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС) твердосплавных пластин при продольном точении и наружном резьбонарезании. Результаты успешной производственной апробации являются основанием для внедрения на участке механообработки МК «Витязь», активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС), на операциях продольного точения и наружного резьбонарезания.

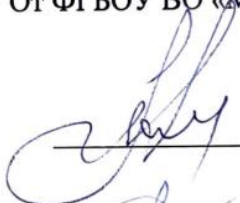
От АО «Машиностроительная компания  
«Витязь»

  
Гонягин А.С.

  
Фаткуллин И.Р.

  
Маямсин С.А.

От ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

  
Мигранов М.Ш

  
Репин Д.С.

  
Митрофанов А.П.

«Утверждаю»

Генеральный директор  
АО «ЛТЗ»Б.Б. Данилов  
«12» октября 2023 г.

## Акт

производственных испытаний активированного коронным разрядом смазочного технологического средства (СОТС) с полимерной присадкой полиэтиленгликоль (ПЭГ).

Комиссия в составе начальника механического цеха Куреева М.Е., главного технолога Зайцева А.А. провели испытания активированного коронным разрядом СОТС с полимерной присадкой полиэтиленгликоль (ПЭГ).

## 1. Цель проведения производственных испытаний.

Повышение стойкости режущего инструмента при использовании СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой полиэтиленгликоль (ПЭГ) активированного коронным разрядом.

## 2. Условия проведения производственной апробации.

Режущий инструмент и обрабатываемый материал

Метчики ГОСТ 3266-81 M22x1,5 6H HSS-E (P9M4K8). Обрабатываемый материал – гайка шестигранная нормальная из коррозионно-стойкой, жаропрочной стали 40X13 ГОСТ ISO 4032-2014.

СОТС «Эфтол» (ТУ 0258-137-05744685-00) концентрация рабочего раствора 5%. Концентрация присадки ПЭГ в рабочем растворе СОТС 3,5%.

Режим резания и станочное оборудование.

Эксплуатационные испытания проводились при нарезании резьбы при следующих режимах – скорость резания  $V = 12$  м/мин,  $n = 180$  об/мин,  $S = 1,5$  мм, на станке 16K20.

## 3. Результаты производственных испытаний.

Результаты проведенных испытаний метчиков M22x1,5 6H HSS-E при нарезании резьбы на гайке шестигранной нормальной из стали 40X13 приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты производственных испытаний метчиков M22x1,5 6H HSS-E при использовании активированного СОТС с полимерной присадкой (ПЭГ)

Технологические параметры	Варианты		Показатели
	Эфтол+ПЭГ (без активации коронным разрядом)	Эфтол+ПЭГ (активация коронным разрядом)	
Количество обработанных деталей, шт	100	220	Увеличение стойкости в 2,2 раза

**Вывод:**

Испытание активированного коронным разрядом СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой ПЭГ при механической обработке резанием повышает стойкость обрабатываемого материала в 2 раза по сравнению с СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой ПЭГ без активации.

Результаты испытаний показали, что применение активированного коронным разрядом СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой полиэтиленгликоль целесообразно при механической обработке коррозионно-стойких, жаропрочных сталей.

Начальник цеха

Главный технолог

М.Е. Куреев

А.А. Зайцев

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор  
АО «УАП «Гидравлика»


В.Е. Токарев  
М.П.  
2024 г.

АКТ

**производственного внедрения  
активированного коронным разрядом смазочно-охлаждающего  
технологического средства (СОТС) с полимерной присадкой  
поливиниловый спирт (ПВС) для лезвийной обработки хромоникелевых  
сплавов**

Комиссия в составе: от АО «УАП «Гидравлика» - заместитель технического директора Гарифуллин Р.И.; главный технолог Белоклоков И.Ю., начальник цеха Мустафин Т.Р. и от ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» - аспирант Репин Д.С. (разработчик технологии получения и применения СОТС); д.т.н., профессор Мигранов М.Ш., к.т.н., доцент Митрофанов А.П. по результатам производственной апробации и эксплуатационных испытаний в период с 01.10.2023 г. по 28.02.2024 г. при продольном точении и резьбонарезании токарными резцами марки ВК6 ОМ жаропрочного хромоникелевого сплава ЭИ – 654 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т составила настоящий акт.

1. Цель проведения производственной апробации: повышение производительности и эффективности лезвийной обработки резанием за счет увеличения периода стойкости режущего инструмента при улучшении показателей качества обработанной поверхности на производственной площадке АО «УАП «Гидравлика» на операциях продольного точения с использованием активированного СОТС («Эфтол») с полимерной присадкой (ПВС). По результатам производственной апробации и эксплуатационных экспериментальных испытаний принято решения о целесообразности внедрения активированного СОТС с полимерной присадкой в АО «УАП «Гидравлика» на операциях токарной обработки жаропрочных никелевых сплавов и нержавеющей сталей.

2. Условия проведения производственной апробации.

*Режущий инструмент и обрабатываемый материал*

Державка токарная CRSNR 3232P 19 для наружного точения четырехгранными твердосплавными пластинами ВК6 ОМ (10x10 мм) и твердосплавных для резьбонарезания на универсальных токарных станках и станках с ЧПУ жаропрочного хромоникелевого сплава ЭИ – 654 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т, используемых при изготовлении валов и деталей, работающих при повышенных температурах.

### *Режим резания и станочное оборудование*

Эксплуатационные испытания проводились на операции продольного точения на следующих режимах – для ЭИ – 654: скорость резания  $V=95$  м/мин, подача  $S=0,11$  мм/об, глубина резания  $t=0,5$  мм и для 12Х18Н10Т: скорость резания  $V=110$  м/мин, подача  $S=0,11$  мм/об, глубина резания  $t=0,5$  мм. В качестве станочного оборудования использовался токарный станок с ЧПУ Mazak QTN400-II. Измерение величины фаски износа по задней поверхности исследуемых пластин проводились на оптическом электронном инструментальном микроскопе. Измерения осуществлялись по истечении каждых 5 минут эксплуатации пластин. Полученные данные записывались в таблицы испытаний.

### 3. Результаты проведения производственной апробации.

Результаты проведенных эксплуатационных испытаний твердосплавных пластин при продольном точении и наружном резбонарезании жаропрочного хромоникелевого сплава ЭИ – 654 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с использованием активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС) подтвердили возможность повышения производительности обработки в среднем на 25 – 30 % за счет увеличения периода стойкости инструмента при обеспечении требуемых показателей качества обработанной поверхности.

### 4. Заключение.

Проведенные производственные испытания и экспериментально установленные данные позволяют сделать заключение о значительном повышении периода стойкости инструмента с использованием активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС) твердосплавных пластин при продольном точении и наружном резбонарезании жаропрочного хромоникелевого сплава ЭИ – 654 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

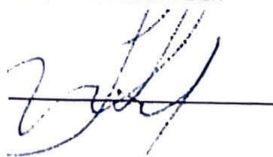
Результаты успешной производственной апробации являются основанием для внедрения на участке механообработки АО «УАП «Гидравлика», активированного СОТС с полимерной присадкой (ПВС), на операциях продольного точения и наружного резбонарезания жаропрочного хромоникелевого сплава ЭИ – 654 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

От АО «УАП «Гидравлика»

От ФГБОУ ВО «МГТУ  
«СТАНКИН»



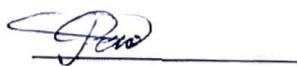
Гарифуллин Р.И.



Мигранов М.Ш



Белоклоков И.Ю.



Репин Д.С.



Мустафин Т.Р.



Митрофанов А.П.

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального  
директора АО «ИВХИМПРОМ»  
по техническим вопросам

Рябов М.Ю.

2024 г.



Акт

производственных испытаний активированного коронным разрядом смазочно-охлаждающего технологического средства (СОТС) с полимерной присадкой поливиниловый спирт (ПВС)

Акт составлен по результатам производственных испытаний СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой поливиниловый спирт (ПВС) активированного коронным разрядом в процессе механической обработки металлов в период январь – март 2024 года.

Цель проведения производственных испытаний.

Повышение периода стойкости режущего инструмента при применении СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой поливиниловый спирт (ПВС) активированного коронным разрядом.

Обрабатываемый материал: сталь 45. Применяемый режущий инструмент: резцы токарные, оснащенные пластинами из твердого сплава Т15К6.

В ходе испытаний были выявлены следующие преимущества:

СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой ПВС активированный коронным разрядом обладает хорошими смазочными и охлаждающими свойствами; пенообразование не замечено; хорошая стойкость к биопоражению – за время испытаний загнивания не замечено.

Испытания проводились при точении вала из стали 45 режущим инструментом, оснащенным пластинами из твердого сплава Т15К6.

Режимы резания  $V=110$  м/мин,  $S=0.5$  мм/об.,  $t=0.5$  мм.

Испытания показали, что применение активированного коронным разрядом СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой ПВС позволяет повысить период стойкости режущего инструмента в 1.5-2 раза по сравнению с СОТС «Эфтол» с полимерной присадкой ПВС без активации.

Результаты успешных производственных испытаний являются основанием для применения активированного СОТС с полимерной присадкой ПВС на операциях токарной обработки заготовок изделий из конструкционных углеродистых сталей.

Члены комиссии:

От АО «ИВХИМПРОМ»

Начальник ремонтно-механической службы

А.Н. Бедрин

Начальник участка №3

А.А. Сырбу



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Матрица планирования и результаты экспериментов по определению концентрации присадки и напряжения на коронирующем электроде при точении

	C, %	U, В	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	y <sub>1</sub> , мин	y <sub>2</sub> , мин	y <sub>3</sub> , мин	$\bar{y}$ , мин	$\hat{y}$ , мин	Примечание
Без СОТС	-	-	-	-	-	-	-	2,57	3,56	3,41	3,18	-	Обрабатываемый материал – сталь 45  Режущий инструмент Р6М5 V = 60 м/мин, S = 0,1 мм/об, t = 0,5 мм.
СОТС 1			-	-	-	-	-	15,12	14,47	15,38	15	-	
СОТС 1 (-)	-	-9	-	-	-	-	-	22,34	23,21	23,45	23	-	
	-	-6	-	-	-	-	-	24,47	23,31	24,25	24	-	
	-	-3	-	-	-	-	-	22	23	21,44	22,14	-	
СОТС 1 (+)	-	+9	-	-	-	-	-	18,45	17	16,35	17,26	-	
	-	+6	-	-	-	-	-	18,42	19,05	17,22	18,23	-	
	-	+3	-	-	-	-	-	18,13	17,1	17	17,41	-	
СОТС 2	0,9	-	-	-	-	-	-	17,28	16,21	15,54	16,34	-	
	0,6	-	-	-	-	-	-	16,52	18,47	17,55	17,5	-	
	0,3	-	-	-	-	-	-	15,27	16,26	15,06	15,53	-	
СОТС 3	5	-	-	-	-	-	-	15,47	17,23	16,26	16,32	-	
	3	-	-	-	-	-	-	17,18	16,48	17,34	17	-	
	1	-	-	-	-	-	-	16,11	15,12	15,17	15,46	-	
СОТС 2 (-)	0,9	-9	1	1	1	1	1	28,45	27,56	28,44	28,15	28,23	
	0,9	-6	1	0	0	1	0	29,6	28,53	30,04	29,34	30	
	0,9	-3	1	-1	-1	1	1	26,41	27,21	28,06	27,23	27,28	
	0,6	-9	0	1	0	0	1	31	30,08	30,31	30,46	31,35	
	0,6	-6	0	0	0	0	0	32,45	33,28	31,54	32,42	32,17	
	0,6	-3	0	-1	0	0	1	31,24	29,28	28,13	29,55	29,31	
	0,3	-9	-1	1	-1	1	1	25,13	26,47	25	25,5	25,32	
	0,3	-6	-1	0	0	1	0	25,4	25,13	26,57	26	26	

## Продолжение приложения В

	0,3	-3	-1	-1	1	1	1	23,2	22,44	21,55	22,4	22,59	
СОТС 2 (+)	0,9	+9	1	1	1	1	1	17,41	17	17,34	17,25	18,01	
	0,9	+6	1	0	0	1	0	18,52	20,12	19,38	19,34	19,37	
	0,9	+3	1	-1	-1	1	1	21	20,12	20,33	20,48	20,08	
	0,6	+9	0	1	0	0	1	22,31	21,27	22,54	22,05	23	
	0,6	+6	0	0	0	0	0	23,04	24	22,41	23,15	23,33	
	0,6	+3	0	-1	0	0	1	23,03	23,26	21,34	22,54	22,2	
	0,3	+9	-1	1	-1	1	1	20,49	18,54	19,47	19,5	20,19	
	0,3	+6	-1	0	0	1	0	19,49	17,48	18,57	18,5	19,08	
	0,3	+3	-1	-1	1	1	1	18	17,11	16,05	17	16,52	
СОТС 3 (-)	5	-9	1	1	1	1	1	26,11	27	26,07	26,4	26,53	
	5	-6	1	0	0	1	0	28,4	28,53	27,1	28	28,3	
	5	-3	1	-1	-1	1	1	28,53	27,42	28,5	28,15	28,07	
	3	-9	0	1	0	0	1	29,34	29,58	28,36	29,1	29,3	
	3	-6	0	0	0	0	0	29	29,5	30,04	29,5	29,4	
	3	-3	0	-1	0	0	1	27,5	28,4	29,1	28,3	28,56	
	1	-9	-1	1	-1	1	1	26,3	25,5	26,5	26,1	26,13	
	1	-6	-1	0	0	1	0	25,22	26	25,21	25,47	26,03	
	1	-3	-1	-1	1	1	1	24	24,51	23,5	24	24,2	
СОТС 3 (+)	5	+9	1	1	1	1	1	19,34	18,15	18,25	18,58	18,47	
	5	+6	1	0	0	1	0	19,56	20	18,54	19,36	19,41	
	5	+3	1	-1	-1	1	1	19,22	19,03	19,5	19,25	19,3	
	3	+9	0	1	0	0	1	20,14	19,22	19	19,45	19,54	
	3	+6	0	0	0	0	0	19,58	20,49	20,38	20,16	20,05	
	3	+3	0	-1	0	0	1	20,11	19,23	19,2	19,51	19,53	
	1	+9	-1	1	-1	1	1	18,26	19,13	18,14	18,53	18,42	
	1	+6	-1	0	0	1	0	19,13	18,26	18	18,46	18,51	
	1	+3	-1	-1	1	1	1	17,1	17,33	18,07	17,5	17,56	

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Результаты экспериментального исследования влияния варьируемых факторов на период стойкости режущего инструмента на операции точения

Используемая СОТС	Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_1$ ,	$y_2$ ,	$y_3$ ,	$\bar{y}$ ,	$\hat{y}$ ,	Примечание
						$\ln y_1$	$\ln y_2$	$\ln y_3$ ,	$\ln \bar{y}$	$\ln \hat{y}$	
СОТС 1	1	+1	-1	-1	1	109,6 4,6968	111,1 4,7104	107,4 4,67656	109,36 4,6947	109,33 4,688	Обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ- 6  Режущий инструмент ВК60М
	2	+1	-1	1	-1	94,7 4,5507	96,8 4,5726	93,4 4,5368	94,96 4,5535	94,97 4,552	
	3	+1	1	-1	-1	85,8 4,4520	83,2 4,4212	84,6 4,4379	84,53 4,4371	84,53 4,432	
	4	+1	1	1	1	77,2 4,3463	74,8 4,3148	75,4 4,3228	75,8 4,3281	75,81 4,328	
СОТС 2 (-)	1	+1	-1	-1	1	269,7 5,59731	267,4 5,588746	268,6 5,593223	268,56 5,593093	268,55 5,59309	
	2	+1	-1	1	-1	257,2 5,549854	253,4 5,534969	256,8 5,548298	255,8 5,544374	255,8 5,54437	
	3	+1	1	-1	-1	232,6 5,44932	229,4 5,435467	231,7 5,445443	231,23 5,44341	231,22 5,44340	
	4	+1	1	1	1	218,7 5,387701	217,3 5,381279	219,6 5,391808	218,53 5,386929	218,53 5,38692	
СОТС 2 (+)	1	+1	-1	-1	1	170,4 5,138149	169,6 5,133443	172,5 5,150397	170,83 5,140663	170,82 5,140666	
	2	+1	-1	1	-1	157,8 5,061328	154,4 5,039547	156,3 5,051777	156,16 5,050884	156,16 5,05088	
	3	+1	1	-1	-1	145,7 4,98155	143,3 4,96494	146,2 4,984976	145,06 5,050884	145,06 5,05088	

## Продолжение приложения Г

	4	+1	1	1	1	137,5 4,923624	134,2 4,899331	135,4 4,908233	135,7 4,910396	135,72 4,91039
СОТС 3 (-)	1	+1	-1	-1	1	231,4 5,444148	228,6 5,431974	233,4 5,452754	231,13 5,442958	231,13 5,43858
	2	+1	-1	1	-1	215,6 5,373425	218,1 5,384954	217,3 5,381279	217 5,379886	217 5,38426
	3	+1	1	-1	-1	195,4 5,275049	191,5 5,254888	189,4 5,243861	192,1 5,257933	192,1 5,26231
	4	+1	1	1	1	183,6 5,212759	180,7 5,196838	181,5 5,201256	181,93 5,203618	181,93 5,19924
СОТС 3 (+)	1	+1	-1	-1	1	157,5 5,059425	160,1 5,075799	162,3 5,089446	159,96 5,07489	159,95 5,07489
	2	+1	-1	1	-1	146,8 4,989071	142,7 4,960745	145,4 4,979489	144,96 4,976435	144,95 4,97643
	3	+1	1	-1	-1	134,2 4,899331	131,8 4,881286	136,6 4,917057	134,2 4,899225	134,21 4,89922
	4	+1	1	1	1	124,3 4,822698	122,7 4,809742	121,2 4,797442	122,73 4,809961	122,73 4,80996

П. Г.1 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 2 (-)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	5,49	2,3	0,005	значим
$b_1$	-0,077			значим
$b_2$	-0,026			значим
$b_3$	-0,0019			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 2 \cdot 10^{-7}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 5,49 - 0,077x_1 - 0,026x_2</math></p>				

П. Г.2 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 2 (+)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	5,038	2,3	0,013	значим
$b_1$	-0,0575			значим
$b_2$	-0,0575			значим
$b_3$	-0,012			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 2,1 \cdot 10^{-7}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 5,038 - 0,0575 x_1 - 0,0575 x_2</math></p>				

П. Г.3 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 3 (-)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	5,32	2,3	0,009	значим
$b_1$	-0,09			значим
$b_2$	-0,029			значим
$b_3$	0,0022			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 1,32</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 5,32 - 0,09 x_1 - 0,029 x_2</math></p>				

П. Г.4 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 3 (+)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,94	2,3	0,012	значим
$b_1$	-0,085			значим
$b_2$	-0,047			значим
$b_3$	0,0023			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 2 \cdot 10^{-7}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,94 - 0,085 x_1 - 0,047 x_2</math></p>				

П. Г.5 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 1

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,5	2,3	0,0136	значим
$b_1$	-0,12			значим
$b_2$	-0,06			значим
$b_3$	0,008			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 0,527</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,5 - 0,12 x_1 - 0,06 x_2</math></p>				

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты экспериментов по определению шероховатости при точении  
12Х18Н10Т

(точение 12Х18Н10Т – Р6М5)

Виды СОТС	Режимы резания								
	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм
	12	0,1	0,5	18	0,1	0,5	24	0,1	0,5
Резание без СОТС	3,2564			3,487			2,748		
СОТС 1	3,0635			2,852			2,344		
СОТС 1 (+)	2,9784			2,497			2,104		
СОТС 1 (-)	2,924			2,697			2,054		
СОТС 2	2,787			2,362			1,789		
СОТС 3	2,8794			2,534			2,052		
СОТС 3 (+)	2,642			1,482			1,404		
СОТС 3 (-)	2,621			1,844			1,618		
СОТС 2 (+)	2,668			1,66			1,428		
СОТС 2 (-)	2,7021			2,223			1,915		

## ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Результаты экспериментов по определению шероховатости при точении ВТ5-1

(точение ВТ5-1 – Р6М5)

Виды СОТС	Режимы резания								
	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм	$V$ , м/мин	$S$ мм/об	$t$ мм
	15	0,1	0,5	21	0,1	0,5	27	0,1	0,5
Резание без СОТС	6,181			5,31975			5,31575		
СОТС 1	5,6735			4,61125			5,179		
СОТС 1 (+)	5,4175			4,434			4,91725		
СОТС 1 (-)	5,24925			4,26625			4,70025		
СОТС 2	4,5165			4,41925			4,052		
СОТС 3	4,7005			4,469			4,52825		
СОТС 3 (+)	4,37775			4,004			4,671		
СОТС 3 (-)	4,11675			3,8835			3,9515		
СОТС 2 (+)	4,15825			4,12625			4,3805		
СОТС 2 (-)	3,915			3,835			3,94275		

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Результаты экспериментального исследования влияния варьируемых факторов на период стойкости режущего инструмента на операции сверления

Используемая СОТС	Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}$	$\hat{y}$	Примечание
						$\ln y_1$	$\ln y_2$	$\ln y_3$	$\ln \bar{y}$	$\ln \hat{y}$	
СОТС 1	1	+1	-1	-1	1	63,7 4,1541	65,6 4,1835	67,8 4,2165	65,7 4,1851	4,18	Обрабатываемый материал – титановый сплав ВТ-6  Режущий инструмент Р6М5К5
	2	+1	-1	1	-1	62,7 4,1383	61,1 4,1125	60,5 4,1026	61,43 4,1178	4,114	
	3	+1	1	-1	-1	53,4 3,9778	57,5 4,0517	56,2 4,0289	55,7 4,0199	4,016	
	4	+1	1	1	1	54,7 4,0018	51,8 3,9473	53 3,9702	53,16 3,9733	54,7 4,0018	
СОТС 2 (-)	1	+1	-1	-1	1	94,8 4,551769	92 4,521789	92,4 4,526127	93,01 4,533228	92,997 4,533227	
	2	+1	-1	1	-1	84,8 4,440296	81,6 4,401829	82,7 4,41522	83,03 4,419115	83,023 4,419113	
	3	+1	1	-1	-1	76,5 4,337291	73,4 4,295924	74,3 4,308111	74,73 4,313775	74,723 4,313774	
	4	+1	1	1	1	69,1 4,235555	65,4 4,180522	66,8 4,201703	67,1 4,205927	67,097 4,205926	
СОТС 2 (+)	1	+1	-1	-1	1	84,7 4,439116	82,5 4,412798	81,7 4,403054	82,96 4,418323	82,96 4,418321	
	2	+1	-1	1	-1	74,6 4,312141	75,2 4,320151	77,8 4,354141	75,86 4,328811	75,86 4,328809	
	3	+1	1	-1	-1	71,7 4,272491	68,5 4,226834	69,6 4,242765	69,93 4,247363	69,92 4,247361	

## Продолжение приложения Ж

	4	+1	1	1	1	60,9 4,109233	63,7 4,154185	61,1 4,112512	61,9 4,12531	61,9 4,125308	
СОТС 3 (-)	1	+1	-1	-1	1	84,9 4,441474	86,1 4,455509	84,6 4,437934	85,2 4,444973	85,597 4,444968	
	2	+1	-1	1	-1	78,8 4,366913	76,3 4,334673	79,4 4,374498	78,16 4,358695	78,163 4,35869	
	3	+1	1	-1	-1	64,1 4,160444	65,4 4,180522	67,8 4,216562	65,76 4,185843	65,757 4,185838	
	4	+1	1	1	1	63,9 4,157319	65,4 4,180522	62,5 4,135167	63,93 4,157669	63,923 4,157664	
СОТС 3 (+)	1	+1	-1	-1	1	78,5 4,363099	73,8 4,301359	72,7 4,286341	75 4,316933	75 4,316928	
	2	+1	-1	1	-1	73,2 4,293195	71,6 4,271095	74,2 4,306764	73 4,290352	73 4,290347	
	3	+1	1	-1	-1	69,8 4,245634	66,7 4,200205	67,4 4,210645	67,96 4,218828	67,96 4,218823	
	4	+1	1	1	1	59,8 4,091006	61,4 4,11741	60,7 4,105944	60,63 4,104786	60,64 4,104781	

П. Ж.1 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 3 (+)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,23	2,3	0,021	значим
$b_1$	-0,071			значим
$b_2$	-0,0353			значим
$b_3$	-0,02			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 2 \cdot 10^{-7}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,23 - 0,071x_1 - 0,0353x_2</math></p>				

П. Ж.2 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 2 (-)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,37	2,3	0,017	значим
$b_1$	-0,11			значим
$b_2$	-0,055			значим
$b_3$	0,00145			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 2 \cdot 10^{-7}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,37 - 0,11x_1 - 0,055x_2</math></p>				

П. Ж.3 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 2 (+)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,28	2,3	0,018	значим
$b_1$	-0,093			значим
$b_2$	-0,053			значим
$b_3$	-0,0081			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 6,4 \cdot 10^{-8}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,28 - 0,093x_1 - 0,053x_2</math></p>				

П. Ж.4 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 3 (-)

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,28	2,3	0,017	значим
$b_1$	-0,11			значим
$b_2$	-0,029			значим
$b_3$	0,013			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 1 \cdot 10^{-10}</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,28 - 0,11 x_1 - 0,029 x_2</math></p>				

П Ж.5 Результаты расчета коэффициентов математической модели для СОТС 1

Обозн. коэф-та	Значение	Табличное значение критерия Стьюдента $t$	Доверительный интервал $\Delta b_j$	Вывод
$b_0$	4,07	2,3	0,0052	значим
$b_1$	-0,077			значим
$b_2$	-0,028			значим
$b_3$	0,005			не значим
<p>Расчетное значение критерия Фишера <math>F_{эксн} = 0,159</math>. Табличное значение критерия Фишера <math>F_{табл} = 4,75</math>. Модель значима, так как расчетное значение критерия Фишера оказалось меньше табличного. Таким образом, уравнение математической модели: <math>\hat{y} = 4,07 - 0,077 x_1 - 0,028 x_2</math></p>				

## Результаты исследования термической деструкции полимерных присадок

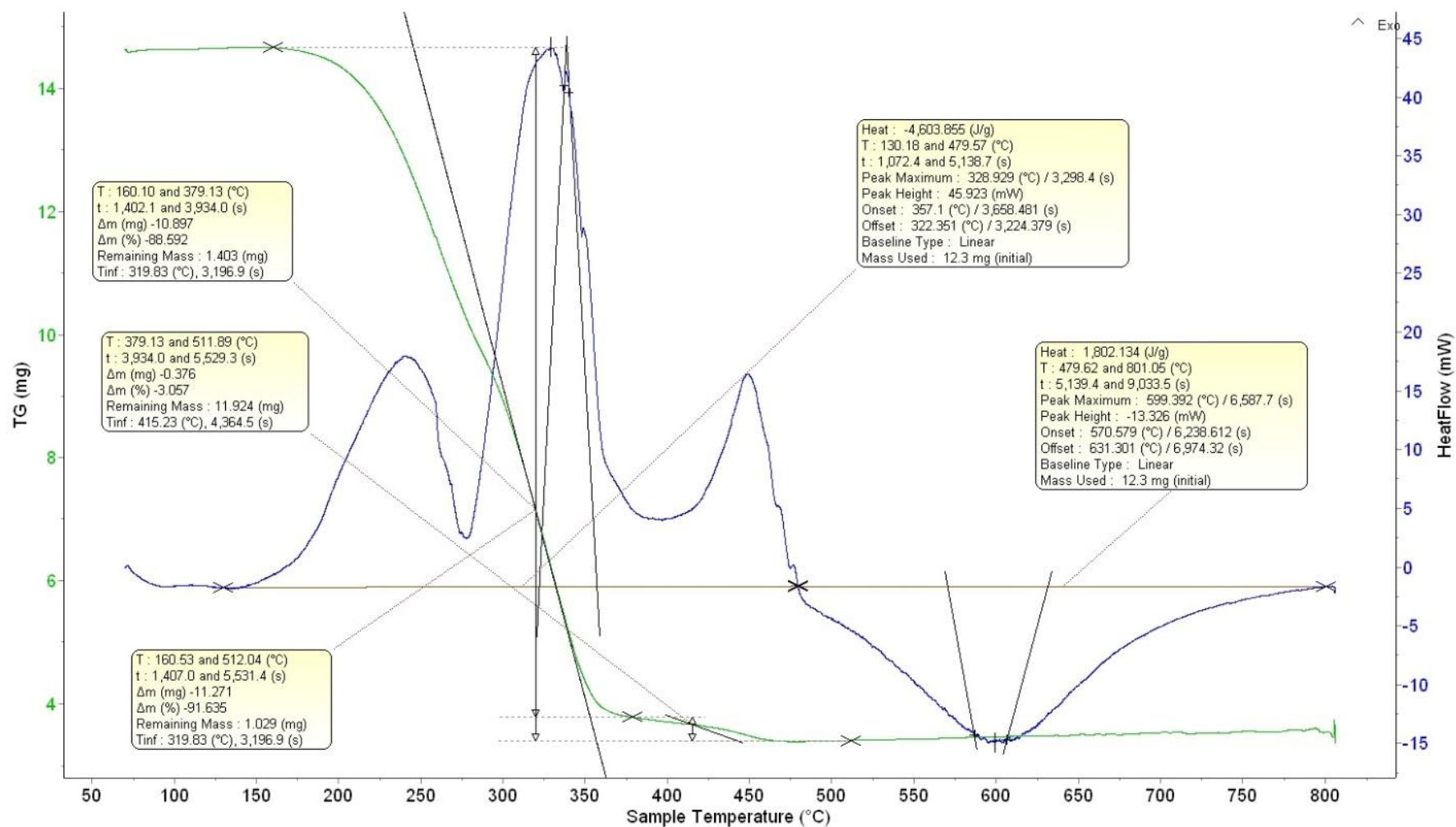


Рисунок И.1 – Результаты исследования термической деструкции полиэтиленгликоля в азотно-кислородной среде при массе навески – 12,3 мг (зеленый – кривая потери массы, синий – кривая теплового потока)

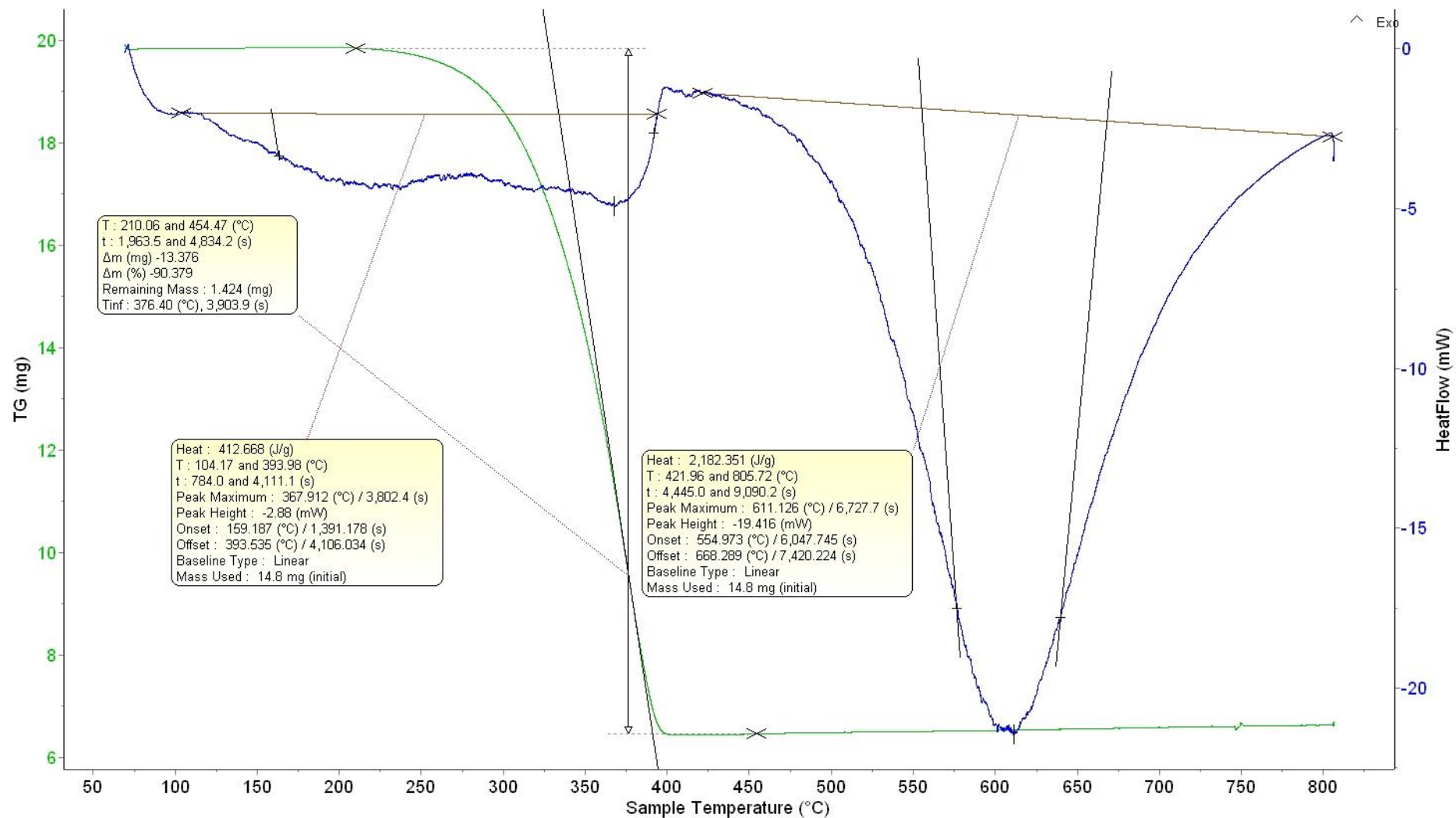


Рисунок И.2 – Результаты исследования термической деструкции полиэтиленгликоля в инертной среде при массе навески 14,8 мг (зеленый – кривая потери массы, синий – кривая теплового потока)

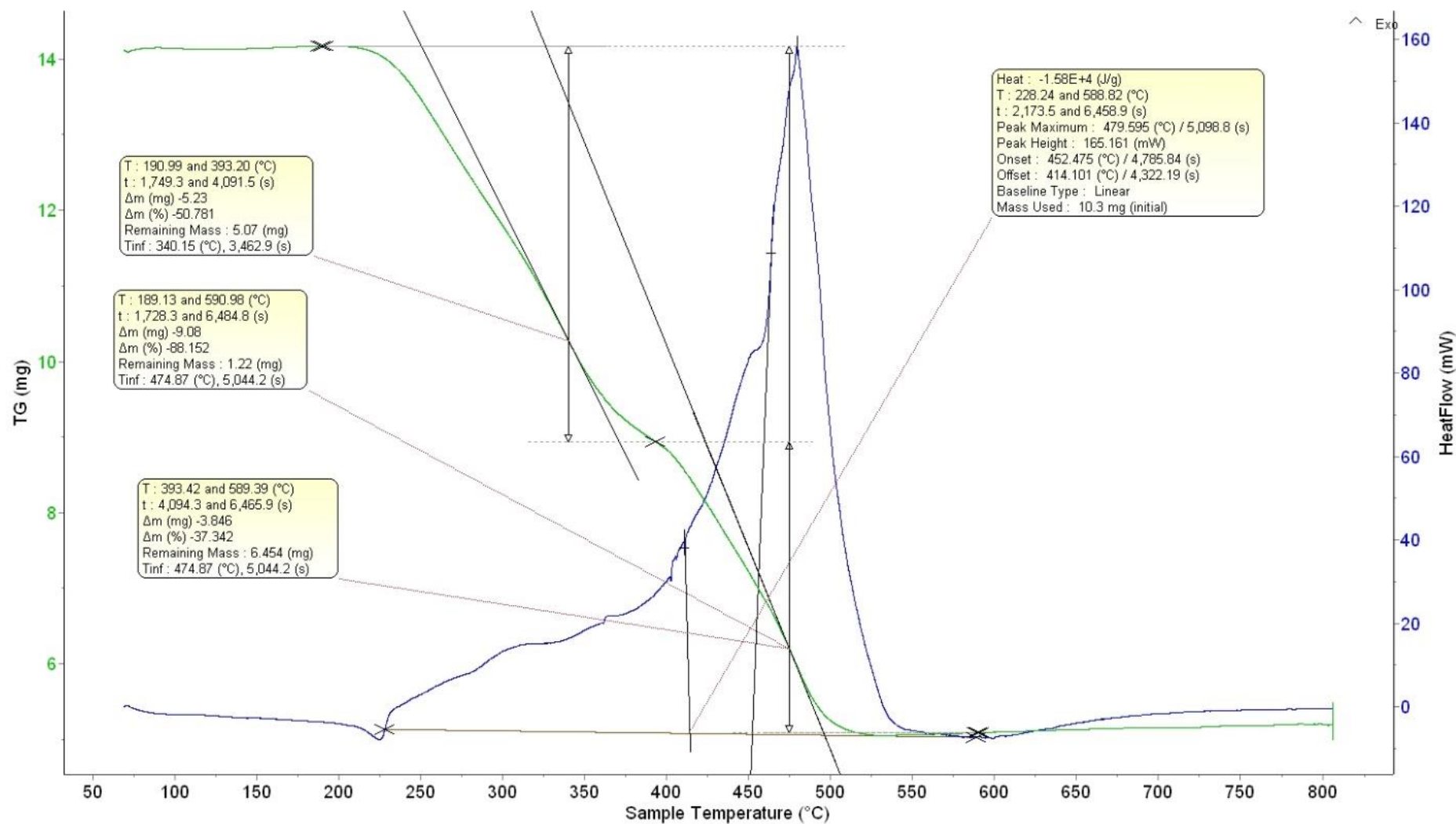


Рисунок И.3 – Результаты исследования термической деструкции поливинилового спирта в азотно-кислородной среде при массе навески 10,3 мг (зеленый – кривая потери массы, синий – кривая теплового потока)

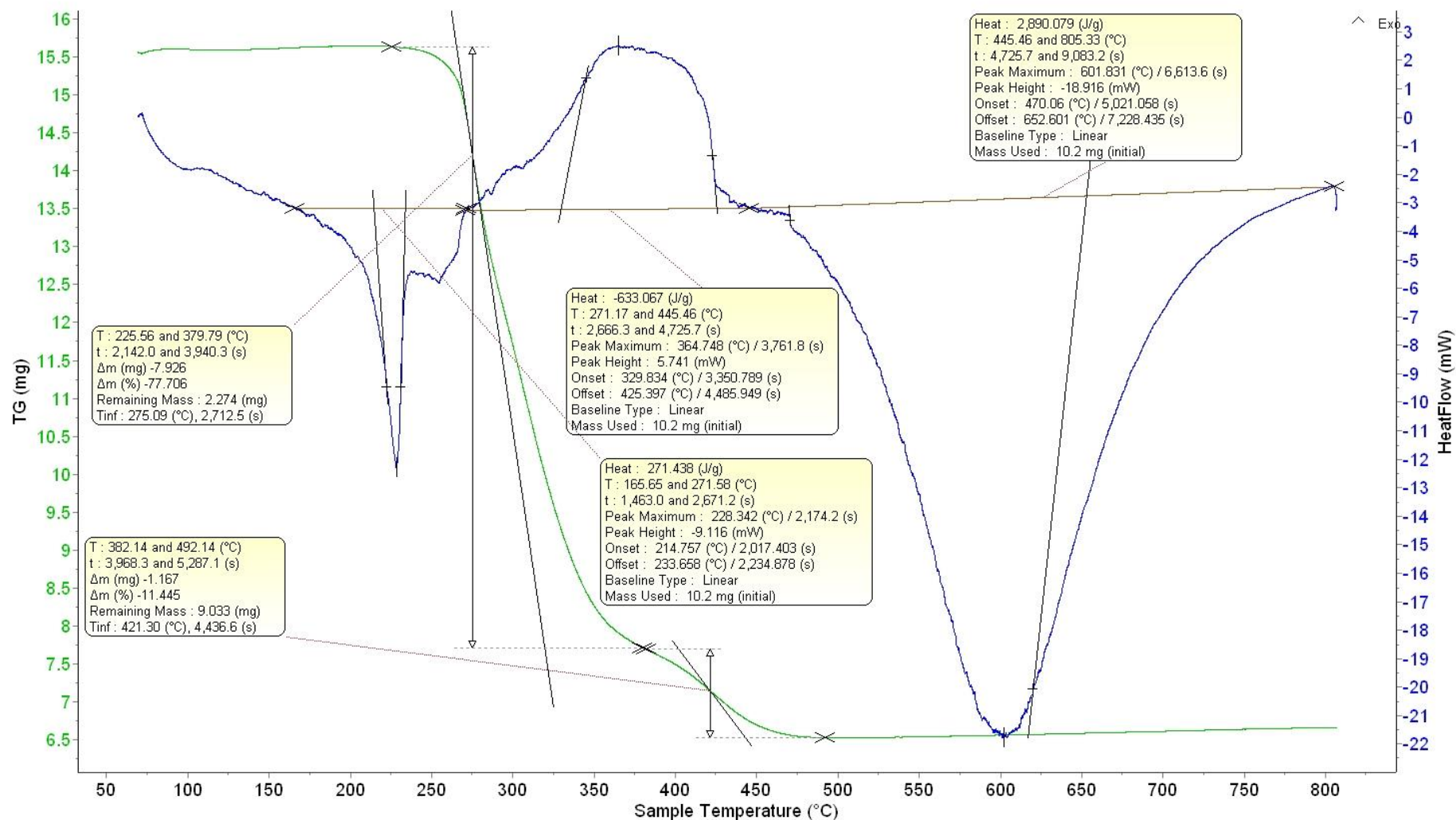


Рисунок И.4 – Результаты исследования термической деструкции поливинилового спирта в инертной среде при массе навески 10,2 мг (зеленый – кривая потери массы, синий – кривая теплового потока)

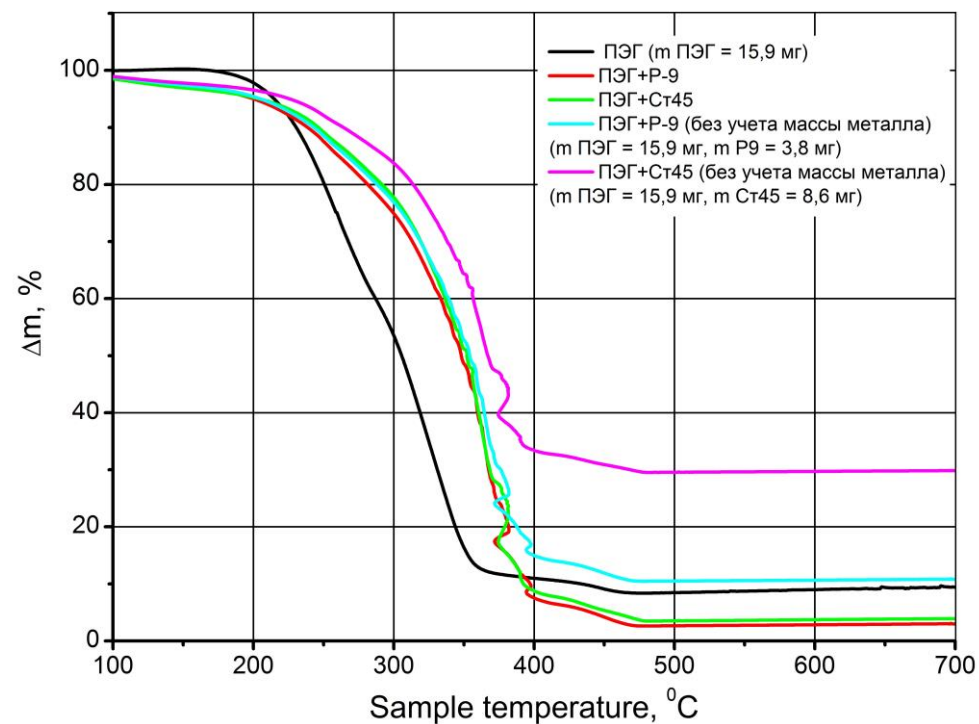
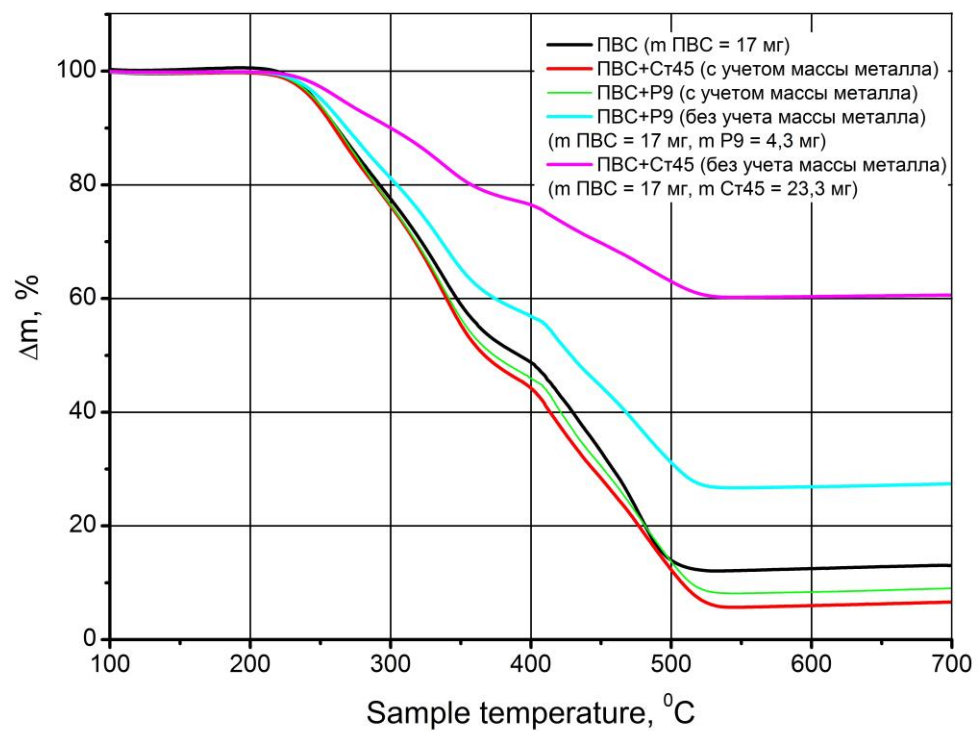


Рисунок И.5 – Потеря массы присадок к СОТС в присутствии образцов обрабатываемого металла и режущего инструмента в азотно-кислородной среде