

ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КРЫМ
«КРЫМСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ФЕВЗИ ЯКУБОВА»

На правах рукописи

Сефедин Исмаил Бей Дилявер оглу

УДК 621.9.02

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ЕГО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент

Ягьяев Эльмар Энверович

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА	12
1.1 Металлорежущий инструмент: материалы, виды, особенности эксплуатации.....	13
1.2 Кинетика износа инструмента	14
1.3 Анализ существующих методов повышения износостойкости	21
Выводы по главе.....	35
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ	37
2.1 Принципы лазерной абляции и их применение для изменения поверхности инструментов	38
2.2 Построение основных закономерностей и взаимосвязей параметров определяющих технологический процесс получения микро- и наноструктур методом лазерной абляции.....	39
2.2.1 Влияние длины волны и типа лазера на механизм лазерной абляции .	41
2.2.2 Влияние энергетических параметров на механизм лазерной абляции	42
2.2.3 Влияние технологических условий обработки	45
2.3 Формирование дискретных диффузионных покрытий.....	50
2.4 Физико-химические закономерности формирования дискретного диффузионного покрытия	51
2.5 Влияние дискретных диффузионных покрытий на работоспособность инструмента	57
2.6 Обоснование технологии комплексного модифицирования поверхности лазерной абляцией и плазмой коронного разряда	60
Выводы по главе.....	66
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	68

3.1 Разработка моделей, описывающих влияние задающих параметров технологического процесса лазерного модифицирования на показатели эффективности и качества обработки	69
3.2 Термодинамические превращения в поверхностном слое инструментальной стали при лазерной абляции на воздухе	72
3.3 Теплопередача при взаимодействии лазерного излучения с инструментальными материалами.....	75
3.3.1 Теплообмен на поверхности инструмента	82
3.4 Моделирование покрытий дискретного типа в условиях напряженно-деформированного состояния системы «покрытие-основание».....	84
3.5 Моделирование покрытий дискретного типа при условии контактной прочности	88
Выводы по главе.....	91
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ.....	93
4.1 Разработка технологии повышения износостойкости металлорежущего инструмента	94
4.2 Разработка технологии формирования дискретного диффузионного покрытия.....	101
4.3 Исследование технологических факторов нанесения дискретного диффузионного покрытия на режущий инструмент	103
4.4 Экспериментальные исследования характеристик режущего инструмента при лазерной абляции и нанесении дискретного диффузионного покрытия	106
4.5 Экспериментальные исследования модифицирования поверхности методом лазерной абляции.....	107
4.6 Экспериментальные исследования морфологии модифицированного режущего инструмента	112
4.7 Анализ изменения химического состава на поверхности режущих пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава при облучении лазерными импульсами наносекундной длительности.....	117

4.8 Исследование гидрофобности поверхностей режущих инструментов при модификации поверхностного слоя лазерными импульсами наносекундной длительности.....	123
4.9 Экспериментальные исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава Т15К6.....	129
4.10 Комбинированное модифицирование поверхности пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава титановольфрамовой группы.....	144
4.11 Экспериментальные исследования стойкостных характеристик инструмента с комбинированным покрытием	160
4.12 Эффективность применения способа лазерного модифицирования рабочей поверхности твердосплавного режущего инструмента.....	171
4.13 Эффективность применения режущего инструмента с дискретным диффузионным покрытием и внедрение технологии нанесения локального диффузного покрытия.....	175
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	179
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ А	195
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	196
ПРИЛОЖЕНИЕ В	197
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	201
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	202

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Конкурентоспособность машиностроительной продукции в условиях современных рыночных отношений можно обеспечить при реализации высокопроизводительных, наукоемких, ресурсосберегающих, экологически чистых технологий.

Механическая обработка с использованием лезвийных режущих инструментов составляет значительную долю среди процессов машиностроительного производства. Для сокращения времени обработки непрерывно совершенствуются технологии и создаются условия повышения производительности по объему снимаемого материала и по площади обрабатываемой поверхности за единицу времени.

Износ инструмента остается одной из основных причин снижения качества продукции и увеличения производственных затрат. Инструмент является слабым звеном технологических производственных процессов, во многом сдерживающим их более интенсивное развитие, что делает особо актуальным глобальные усилия по разработке инновационных высокоэффективных инструментальных материалов и конструкций режущего инструмента. Получение износостойкой поверхности на режущем инструменте – один из наиболее эффективных и актуальных способов существенного повышения основных эксплуатационных возможностей современного металлорежущего инструмента.

Традиционные методы улучшения свойств инструмента, такие как нанесение покрытий или термическая обработка, имеют ограничения, а в некоторых случаях требуют существенных вложений. Так, однослойные покрытия подвержены растрескиванию и скалыванию, а традиционные методы упрочнения не обеспечивают комплексного повышения стойкости к износу, коррозии и термическим нагрузкам.

Среди разнообразия инновационных технологий перспективными представляются применения лазерной абляции (ЛА) и дискретных диффузионных покрытий (ДДП).

Лазерная абляция позволяет с высокой точностью модифицировать микроструктуру поверхности, повышая ее адгезию и механическую прочность. В сочетании с дискретными диффузионными покрытиями это дает возможность обеспечить более равномерное распределение нагрузки и значительно повысить износостойкость инструмента в 1,5-4 раза по сравнению с аналогами.

Увеличение срока службы металлорежущего инструмента снижает затраты на его замену, уменьшает простой оборудования и повышает общую эффективность производства, что особенно актуально для предприятий с крупносерийным и массовым производством.

Несмотря на очевидные преимущества, вопросы совмещения лазерной обработки и нанесения диффузионных покрытий остаются недостаточно изученными. Это требует глубокого анализа и экспериментальной проверки для разработки эффективной технологии.

Комплексное использование ЛА и ДДП представляет собой новый подход расширения технологических возможностей лезвийной обработки, который имеет высокую научную и практическую значимость, позволяя создать универсальные решения для широкого спектра металлорежущих инструментов при различных условиях обработки.

Степень разработанности темы исследования. Большой вклад в решение многих задач по теории режущих материалов, конструированию режущего инструмента, повышению прочности и долговечности режущего инструмента, а также формированию износостойких покрытий внесли отечественные ученые В.П. Табаков, А.С. Верещака, Е.А. Чекалова, С.В. Сизов, А.А. Кужненко, Э.С. Мустафаев, Э.Э. Бобылёв и другие.

Традиционные методы улучшения свойств инструмента, такие как нанесение покрытий или термическая обработка, имеют ограничения, а в некоторых случаях требуют существенных вложений.

Модифицирующие покрытия удерживают лидирующие позиции, как один из наиболее эффективных и актуальных способов существенного повышения основных эксплуатационных возможностей современного металлорежущего инструмента. К сожалению, современные способы получения покрытий, несмотря на свои очевидные преимущества, имеют следующие недостатки: высокая стоимость инструмента, высокая энергоёмкость, в частности при получении толстых, твёрдых и износостойких покрытий; возникновение растягивающих напряжений; низкая адгезия; неоднородная толщина покрытия; охрупчивание покрытия и т.д.

Целью диссертационной работы является повышение износостойкости металлорежущего инструмента на основе разработки комплекса технических решений обоснованные анализом изученных особенностей взаимодействия лазерного излучения и коронного разряда с обрабатываемым (инструментальным) материалом.

Основные задачи исследования:

1. Для разработки комплекса технических решений провести анализ методов повышения износостойкости инструмента.
2. Выявить и формализовать взаимосвязи между входными технологическими факторами и выходными параметрами процесса: твёрдость, шероховатость, микрорельеф, химический состав, температура и толщина модифицированного поверхностного слоя.
3. Разработать методики исследований и осуществить экспериментальную идентификацию разработанных моделей.
4. Произвести оценку полученных результатов при опытно-промышленной эксплуатации.

Научная новизна

1. Установлена взаимосвязь между входными и выходными параметрами процесса комплексного модифицирования поверхности металлорежущего инструмента лазерной абляцией и дискретным диффузионным покрытием, с учетом изменения микроструктуры поверхности и химического состава, что

позволяет прогнозировать поведение технологической системы при изменении режимов обработки.

2. Доказана возможность повышения стойкости металлорежущего инструмента в 2–3 раза при модифицировании его лазерным излучением и дискретным диффузионным покрытием.

3. Разработана методология упрочнения поверхности металлорежущего инструмента позволяющая повысить его работоспособность.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в разработке эффективной технологии повышения износостойкости металлорежущего инструмента;

- увеличение срока службы инструмента в 2 и более раз;

- в снижение производственных затрат на инструмент, уменьшение времени на переналадку станков, сокращение затрат на покупку новых инструментов, снижение объема отходов и уменьшение потребности в ресурсах для производства новых изделий;

- в разработке технологических рекомендаций по получению микро- и наноструктур на режущей поверхности металлорежущего инструмента лазерным излучением, обеспечивающая оптимальное качество обрабатываемой поверхности;

- в разработке и внедрение технологии повышения износостойкости металлорежущего инструмента на основе комплексного модифицирования его поверхности лазерной абляцией и нанесением дискретного диффузионного покрытия в образовательный процесс ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова.

Работа имеет высокую практическую значимость для машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий, а также для смежных отраслей.

Объектом исследования является процесс комплексного модифицирования поверхности металлорежущего инструмента лазерной обработкой и дискретным диффузионным покрытием.

Предметом исследования являются закономерности формирования поверхностного слоя режущего инструмента под воздействие лазерного излучения и коронного разряда.

Методология и методы исследования. В работе выполнены теоретические исследования по анализу и обобщению научной литературы, исследованы физико-химических процессы и термодинамические явления при лазерной абляции и диффузионном насыщении; математическое моделирование; анализ с использованием оптической и сканирующей электронной микроскопии; рентгенофлуоресцентный анализ; лабораторные и натуральные испытания; профилометрические испытания; статистическая обработка результатов.

Данный комплекс методов позволил всесторонне исследовать процессы комбинированного модифицирования поверхности режущего инструмента, установить оптимальные параметры обработки и достичь цели работы по повышению износостойкости инструмента.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в работе, получены автором лично или при его непосредственном участии. В статьях, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора состоит в следующем: в публикациях [62–64] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований; в работе [62, 63] рассмотрен процесс обработки поверхности быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава Т15К6 методом лазерной абляции; в работе [61] определено изменение структуры поверхности титана и некоторых его сплавов под действием лазерного излучения небольшой мощности; в публикации [3] определены термохимические процессы, протекающие в поверхностном слое углеродистой стали под воздействием лазерного излучения в воздушной среде и рассчитаны термодинамические параметры для всех возможных реакций; в патенте [48] авторский вклад составляет 30%, в патенте [49] авторский вклад составляет 50%.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математические модели комплексного моделирования поверхности лазерной обработкой и дискретным диффузионным покрытием характеризующие взаимосвязи между входными и выходными параметрами с учетом изменения микроструктуры поверхности и химического состава, что позволяет

прогнозировать поведение технологической системы при изменении режимов обработки.

2. Результаты экспериментальных исследований процесса повышения стойкости комплексного модифицирования поверхности лазерной обработкой и дискретным диффузионным покрытием на инструментах из сплавов Р6М5, Т15К6, ВК8.

3. Методология повышения стойкости инструмента комплексным модифицированием поверхности лазерной абляцией и дискретным диффузионным покрытием.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

По формуле специальности (...область науки и техники, изучающая закономерности и взаимосвязи в технологических процессах формообразования тел (деталей) путем удаления части начального объема материала, а также в технических средствах реализации процессов (станки, инструмент, комплектующие агрегаты, механизмы и другая технологическая оснастка) на этапах их создания и эксплуатации) и области исследований (теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий; исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки), данная работа соответствует паспорту специальности научных работников – 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей и обоснованностью принятых допущений. Адекватность полученных результатов подтверждена корректным использованием

современных методов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами внедрения в производство (Приложение Г, Д). Часть экспериментальных исследований проводилась при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям) (Договор (Соглашение) № 18589ГУ/2023).

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на следующих научных конференциях: Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием студентов и молодых учёных «Молодая наука», (г. Симферополь, 07 ноября 2025 г.); XVII международная научно-техническая конференция «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров 2025», (г. Алушта, 11 сентября 2025 г.); XIX Международная научно-техническая конференция «Динамика технических систем» ДГТУ, (г. Ростов-на-Дону, 10 апреля 2025 г.); Международная научно-практическая конференция «Современные технологии: опыт внедрения, новые тенденции и перспективы развития 2024» (г. Ялта, пгт Кореиз, 16 сентября 2024 г.); Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием студентов и молодых ученых «Молодая наука» ГБОУВО РК КИПУ им. Ф.Якубова, (г. Симферополь, 8 ноября 2024 г.); Международная конференция «Современные тенденции в производственных технологиях и оборудовании» (ICMTMTE 2022 - 2023) СевГУ, г. Севастополь, 7 сентября 2023 г.; VIII Международная научная конференция «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки» ФГБНУ «НИИСХ Крыма» (г. Симферополь, 26 сентября 2023 г.); Конференция «Научные чтения памяти Февзи Якубова», (г. Симферополь, 8 ноября 2023 г.).

Публикации. Материалы исследования опубликованы в 5 статьях. В рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК, опубликовано 5 статей. Получено 2 патента на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы (129 источников) и 5 приложений, изложена на 202 страницах печатного текста, содержит 79 рисунков и 39 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

Процессы механической обработки занимают ключевую роль в современном промышленном производстве как наиболее универсального и массового способа формообразования деталей. Внедрение ресурсоэффективных, высокопроизводительных технологий в машиностроении неразрывно связано с использованием сложного автоматизированного станочного оборудования с компьютерным программным управлением (ЧПУ).

Эффективная эксплуатация таких технологических комплексов возможна лишь при условии обеспечения высокой надёжности их функционирования. Как известно, наиболее слабым элементом в цепи технологической системы «станок–приспособление–инструмент–деталь» (СПИД) является металлорежущий инструмент. Его отказ выступает доминирующим фактором, ограничивающим производительность, точность обработки и экономическую эффективность всего производственного процесса.

Таким образом, режущий инструмент, осуществляющий формообразование путём отделения части обрабатываемого материала в виде стружки, представляет собой системообразующий элемент. Его стойкость и эксплуатационные характеристики непосредственно определяют потенциал всего технологического комплекса, что формирует необходимость фундаментальных и прикладных исследований в области повышения его износостойкости.

Определяющим фактором безотказной работы режущего инструмента являются сохранение физико-механических свойства режущей части инструмента в течении 4-х часовой работы инструмента. Поскольку инструмент и деталь находятся в постоянном контакте с определенными силами трения, вследствие динамического и кинематического процесса взаимодействия двух твердых тел возникают напряжения, которое является результатом контакта металла с металлом, сопровождающаяся деформациями сжатия, растяжением, сдвигами, трением и большим тепловыделением [2, 17, 66].

В зависимости от инструмента, используемого для механической обработки металла, выделяют несколько видов обработки резанием: точение, фрезерование, сверление, строгание, долбление, шлифование, протягивание. Каждый вид имеет разные преимущества, недостатки и связанные с этим затраты.

Работоспособность режущего инструмента в течении заданного интервала времени является функцией множества взаимосвязанных факторов. К ним относятся: режимы резания; свойства обрабатываемого материала; материал и геометрия режущей части инструмента; применение смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ); жесткость системы СПИД. Определяющим фактором безотказной работы режущего инструмента являются физико-механические свойства режущей части инструмента. Состав и свойства материала влияют на твердость, ударную вязкость, износостойкость, теплопроводность и т.д. В следствии действия различных механизмов, таких как истирание, адгезия, диффузия, окисление, эрозия, возникает потребность в условия, при которых возрастает, стабильность стружкообразования и сопротивление макро- или микрохрупкому разрушению, что в свою очередь увеличит стойкость инструмента.

1.1 Металлорежущий инструмент: материалы, виды, особенности эксплуатации

Выбор материала и марки режущего инструмента является важным фактором, который следует учитывать при планировании технологического процесса резания. Одной из основных их особенностей является то, что они должны быть тверже по сравнению с материалом, который они обрабатывают.

Знания о каждом материале режущего инструмента и его производительности важны при правильном выборе. Принимаются во внимание материал обрабатываемой детали, тип и форма компонента, условия обработки и уровень качества поверхности, требуемый для каждой операции.

В данном разделе проведены исследования о каждом материале режущего инструмента, его преимуществах и рекомендациях по наилучшему использованию.

Материалы для режущих инструментов имеют различные показатели твердости, вязкости и износостойкости и делятся на многочисленные марки с определенными свойствами. Как правило, материал для режущих инструментов, который применяется в процессах резания, должен быть:

- Твердый;
- Прочный;
- Химически стабилен;
- Устойчив к резким перепадам температур.

К распространенным инструментальным материалам относятся инструментальные стали (такие как углеродистая инструментальная сталь, легированная инструментальная сталь, быстрорежущая сталь), твердый сплав, керамика, кубический нитрид бора и алмаз. Быстрорежущая сталь и твердый сплав наиболее часто используются в производстве.

Зная информацию об основных материалах для режущих инструментов и их свойствах, можно выбрать оптимальный вариант для технологического процесса.

1.2 Кинетика износа инструмента

Износ инструмента – это изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности изделия или инструмента вследствие разрушения (изнашивания) поверхностного слоя изделия при трении, что в конечном итоге приводит к потере работоспособности инструмента.

В процессе резания инструмент со временем подвергается износу, поскольку инструмент и деталь находятся в постоянном контакте с определенными силами трения, в следствии динамического и кинематического процесса взаимодействия двух твердых тел [2, 17, 66]. Возникает напряжение, которое является результатом контакта металла с металлом, сопровождающееся деформациями сжатия,

растяжением, сдвигами, трением и большим тепловыделением. В результате действия сил и нагрузок, поверхностный слой заготовки деформируется и удаляется в виде срезанной стружки. Сдвиговые деформации вытягивают зерна, располагая их цепочками, вследствие чего, происходит упрочнение обрабатываемого материала [16, 73, 74].

Весь процесс резания можно представить виде графика зависимости износа задней поверхности во времени (рисунок 1.2.1).



Рисунок 1.2.1 – Зависимость износа от времени резания

Из рисунка 1.2.1 следует, что износ задней поверхности используется как показатель износостойкости инструмента, а сам инструмент является функцией времени резания.

Выход из строя инструмента из-за его износа является типичным, но его можно спрогнозировать и предотвратить. Износ обычно происходит с течением времени вследствие температурно-силовых воздействий в зоне резания. Механизм износа связан с постепенными структурно-фазовыми изменениями в материале инструмента, которые под действием высоких температур и механических нагрузок приводят к разупрочнению и снижению его твердости [11].

Работоспособность инструмента зависит от многих переменных: тип оборудования, твердость заготовки, количество операций, выполняемых с деталью, сила, приложенная для каждой, и другие переменные будут способствовать износу инструмента. Из-за этих переменных износ инструмента может сопровождаться различными видами износа.

Разрушение инструмента. Достижение рабочих нагрузок, превышающих структурную прочность инструмента, приводит к критическому виду отказа инструмента. Этот процесс развивается вследствие накопления в материале инструмента напряжений, инициированных как статическими, так и динамическими (ударными, циклическими) силами резания. Критерием работоспособности инструмента в таком случае будет служить предел прочности материала σ_b , так для быстрорежущей стали он составляет 1800–2000 МПа, для твердых сплавов 500–800 МПа. Механизм разрушения может носить характер хрупкого, или вязкого процесса. Хрупкое разрушение проявляется в виде сколов, или выкрашивания режущих кромок. Критической характеристикой является, частичное или сплошное разрушение участков режущей кромки более 0,3 мм [73, 74].

Наиболее характерен такой вид износа для условий прерывистого резания, когда режущий клин инструмента испытывает динамические и циклические нагрузки. При таких условиях работоспособность инструмента будет определяться прочностью инструмента, включая его сопротивляемость ударным и усталостным нагрузкам [11].

Причиной разрушения также могут быть некорректные режимы резания или недостаточная жесткость крепления инструмента. Своевременно предотвратить это можно при мониторинге вибраций и шума станка.

Абразивный износ. Скопление твердых включений обрабатываемого материала может привести к внедрению их в контактную поверхность инструмента. Эти включения могут истереть инструмент с течением времени, снижая его заточку и производительность. Основное воздействие оказывают включения высокой твердости, такие как: карбиды, оксиды, интерметаллиды и т.д.

[16, 37]. При абразивном изнашивании образуются два характерных вида износа. На главной задней поверхности вследствие прямого микрорезания и пластического выдавливания материала инструмента твёрдыми частицами, формируется ленточка шириной h_u (рисунок 1.2.2). На передней поверхности, вблизи режущей кромки, под действием абразивного трения стружки, содержащей упрочнённые частицы, о поверхность инструмента, образуется лунка или кратер с параметрами (b – длина лунки, a – ширина лунки) (рисунок 1.2.2).

Абразивное действие может возрасти вследствие применения химически активных СОТС. Эта форма износа чаще всего возникает при обработке материалов с твёрдыми включениями.

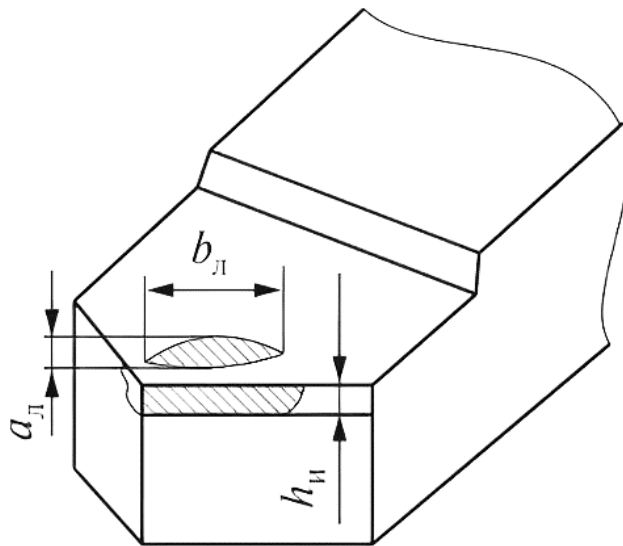


Рисунок 1.2.2 – Виды абразивного износа режущего инструмента [2]

Из рисунка 1.2.2 следует, что износ задней и передней поверхности используется как мера износа инструмента, а сам инструмент является функцией времени резания. Следовательно, для эффективного сопротивления абразивному износу твёрдость инструментального материала должна существенно превышать твёрдость абразивных включений в заготовке.

Адгезионный износ. Поскольку трение инструментов и заготовки вызывает высокие температуры, может возникнуть адгезионный износ. Стружка, стекающая по поверхности инструмента, взаимодействует с химически чистыми

поверхностями, что приводит к локальному схватыванию (холодной сварке) материалов. Эти связи циклически разрушаются в результате усталостных явлений под действием нагрузок, приводя к вырыванию частиц материала инструмента [2, 16, 17, 37, 66, 73, 74]. В зависимости от свойств обрабатываемого материала, частицы могут схватываться и оставаться на лезвии инструмента в виде наростов шириной h (рисунок 1.2.3.). Если размер нароста превышает 0,1 мм, то он оказывает абразивный износ из-за своей высокой твердости и нарушает размеры обрабатываемого материала.

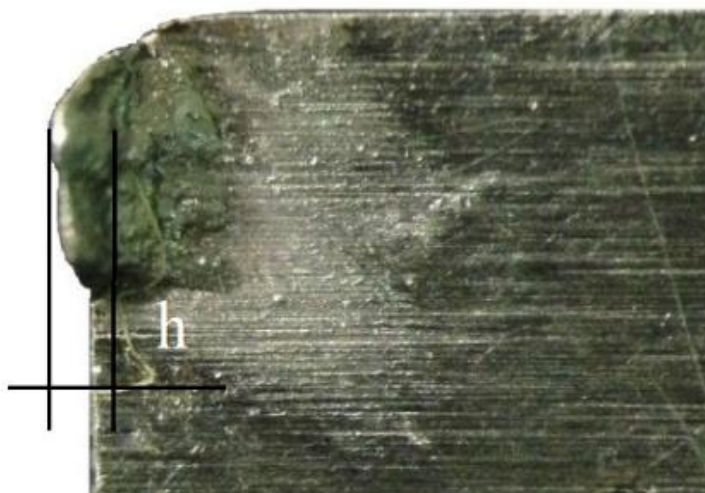


Рисунок 1.2.3 – Образование нароста на передней поверхности инструмента

Интенсивность адгезионного износа определяется режимами резания, физико-химическим сродством обрабатываемого и инструментального материалов, а также составом СОТС.

Диффузионный износ является доминирующим механизмом износа инструмента при высокоскоростной обработке, когда температура в зоне резания превышает 800–900 °С. Стоит отметить, что данный температурный диапазон характерен для наиболее распространённых твердосплавных инструментов (WC-Co), для других классов инструментальных материалов действуют иные температурные диапазоны, обусловленные их теплостойкостью. При таких условиях тепловая активация интенсифицирует взаимную диффузию элементов

материала инструмента и заготовки через границу их контакта. Это приводит к обеднению поверхностного слоя инструмента легирующими элементами (например, кобальтом в твёрдых сплавах), изменению его фазового состава и, как следствие, к значительному разупрочнению и потере теплостойкости. Пластические деформации, сопровождающие процесс резания, ускоряют диффузию, разрушая защитные окисные плёнки и обновляя контактные поверхности. Интенсивность процесса напрямую зависит от температуры, времени контакта, давления в зоне резания, а также от химического состава и сродства контактирующих материалов [74]. Таким образом, диффузионный износ является критерием максимально допустимой скорости резания и определяет необходимость применения теплостойких покрытий или инструментальных материалов с низкой диффузионной активностью.

Химический износ является результатом взаимодействия материала инструмента с химически активными компонентами окружающей среды, прежде всего с кислородом воздуха, при высоких температурах резания. Этот процесс носит двойственный характер. С одной стороны, образование плотной и прочной оксидной плёнки может повышать стойкость инструмента, выполняя роль защитного барьера, который предотвращает прямой контакт и схватывание поверхностей [54]. С другой стороны, если плёнка является хрупкой, непрочной или плохо сцепленной с основой, она легко удаляется трением стружки и заготовки, обнажая свежий слой металла для последующего окисления. Таким образом, изнашивание происходит циклически: образование оксидного слоя; механическое удаление; повторное окисление. Следовательно, сопротивление химическому износу определяется не только общей стойкостью к окислению материала инструмента, но и адгезионной прочностью, а также когезионной целостностью формирующейся на его поверхности оксидной плёнки [11].

Термический износ. Основная часть энергии при резании расходуется на пластическую деформацию и трение, преобразуясь в тепло, что приводит к интенсивному нагреву рабочей части инструмента. При достижении температуры, превышающей порог теплостойкости материала, в его структуре начинаются

необратимые изменения (фазовые превращения), вызывающие падение твёрдости и прочности. Ключевой характеристикой, определяющей сопротивление этому виду износа, является теплостойкость – способность инструментального материала сохранять эксплуатационные свойства при повышенных температурах. Количественно она выражается температурой, при которой твёрдость сохраняется после четырёхчасовой выдержки. Например, для инструментов с микротвёрдостью 890–1500 HV повышение теплостойкости напрямую коррелирует с ростом стойкости [37].

Локальный перегрев и резкие колебания температуры негативно влияют не только на инструмент, но и на заготовку, способствуя образованию термических трещин в поверхностном слое. Для предотвращения нагрева и минимизации термического износа необходимо оптимизировать режимы резания (скорость, подачу), эффективно применять СОЖ, а также использовать инструменты с повышенной теплопроводностью и теплостойкостью.

Из анализа видов износа, можно сделать вывод, что все виды износа инструмента влияют на качество производимых деталей, эффективность оборудования или время простоя, связанное с вмешательством оператора.

В связи с этим, рабочие поверхности инструмента должны иметь улучшенные эксплуатационные свойства, такие как износо-, тепло-, коррозионная стойкость, твердость, прочность, шероховатость. Обычно, отмеченные свойства являются взаимоисключающими так, например, увеличение содержания кобальта и зернистости карбида вольфрама способствует повышению прочности, но при этом снижается твёрдость [56]. Согласно молекулярно-механической теории трения повышение износостойкости инструмента можно достичь при высокой твёрдости поверхности инструмента и низкой прочности ее адгезионной связи с обрабатываемым материалом [42, 50]. Исследования и разработка технологий по получению новых функций (свойств), в близи главной режущей кромки, на поверхностях режущего инструмента, является актуальной научно-технической задачей.

1.3 Анализ существующих методов повышения износостойкости

В разделе приведен критический анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по применению износостойких покрытий на режущем инструменте.

В зависимости от вида инструмента и условий резания процессы абразивного износа, пластической деформации, истирания и коррозии, термической и механической усталости влияют на долговечность, безотказность в работе и ремонтпригодность инструментов. В поверхностных слоях режущих инструментов зарождаются и развиваются процессы приводящие к снижению производительности процессов обработки и качества выпускаемой продукции. В этой связи, рабочие поверхности инструмента должны иметь улучшенные эксплуатационные свойства, такие как износо-, тепло-, коррозионная стойкость, твердость, прочность, шероховатость и др [42, 50, 54, 56].

Как правило, данные свойства находятся в обратной зависимости. Например, увеличение содержания кобальта и размера зерна карбида вольфрама в твёрдом сплаве повышает его прочность и вязкость, но одновременно снижает твёрдость и износостойкость (рисунок 1.3.1). В соответствии с молекулярно-механической теорией трения, оптимальная износостойкость инструмента достигается при сочетании высокой поверхностной твёрдости с низкой адгезионной активностью по отношению к материалу обрабатываемой заготовки [22, 40, 42, 50, 51].

В современных условиях стремительно развиваются технологии модификации рабочих поверхностей, заключающиеся в направленном изменении физико-механических и кристаллохимических свойств поверхности и поверхностного слоя. Формирование поверхностных слоев с уникальным сочетанием характеристик является одним из наиболее эффективных средств повышения работоспособности инструментов. Наряду с наиболее распространенными способами повышения эксплуатационных свойств, такими как термическая обработка, упрочнение путем пластического деформирования,

легирование, нанесение износостойких покрытий, появились перспективные физико-технические способы модифицирования поверхности инструмента.

Повышение износостойкости режущего инструмента можно осуществить при двух основных условиях: создание наноструктур в сплавах (объемная модификация) и нанесение функциональных покрытий. Первое условие позволяет достичь высокой поверхностной твердости и может быть реализовано за счёт создания наноструктур в твёрдых сплавах, что повышает их стойкость в 1,5–2,5 раза (таблица 4, [86]). Соблюдение второго условия приводит к снижению адгезионной активности и реализуется путем нанесения износостойких покрытий с низким коэффициентом трения по отношению к обрабатываемому материалу.

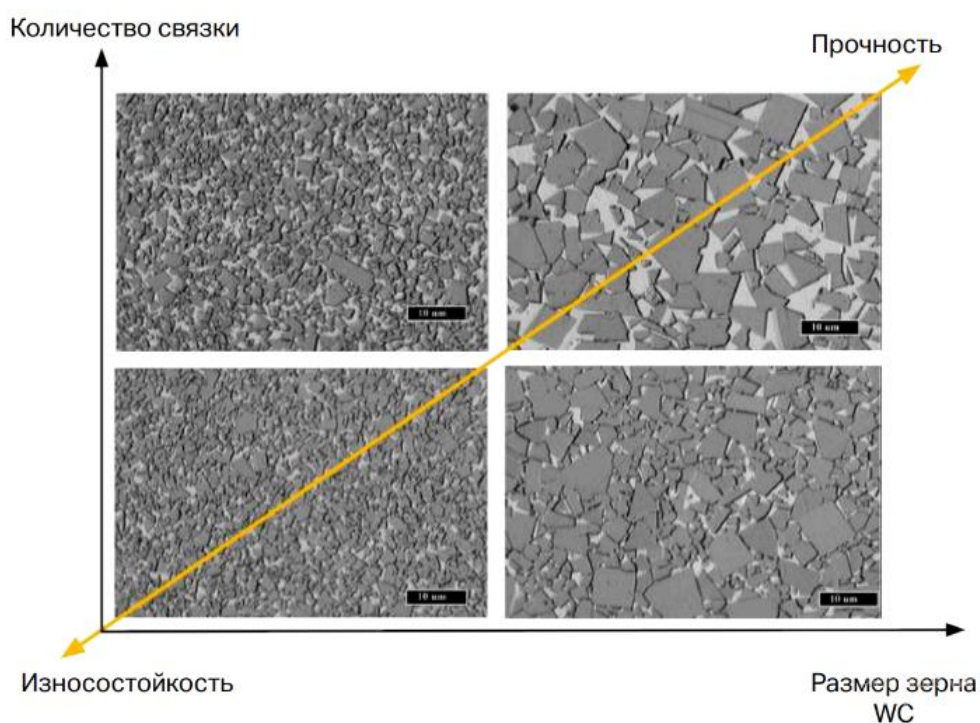


Рисунок 1.3.1 – Влияние количества связки и размера зерна WC на износостойкость и прочность сплава [56]

При этом создание регулярной наноструктуры в инструментах больших размеров (монолитные фрезы, свёрла) остаётся технологически сложной задачей, и данный метод пока применяется преимущественно для сменных пластин простых форм. В связи с этим особую актуальность приобретают технологии

восстановления дорогостоящего инструмента. Например, в работе С.В. Федорова [76] разработана эффективная методика удаления изношенных покрытий с твёрдосплавного инструмента, что расширяет возможности его восстановления.

Нанесение покрытий также является ключевым элементом в решении задачи отказа от применения смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), что обусловлено как экологическими требованиями, так и экономическими соображениями. Затраты на приобретение, использование и утилизацию СОТС могут составлять от 5 до 15% себестоимости продукции [25]. По мнению авторов работы [69], наибольший потенциал на современном этапе заключается именно в совершенствовании технологий нанесения покрытий и оптимизации пар «покрытие–инструментальный материал».

Таким образом, модифицирующие покрытия (рисунок 1.3.2) сохраняют лидирующие позиции как один из наиболее эффективных и технологически реализуемых способов существенного повышения эксплуатационных характеристик современного металлорежущего инструмента.

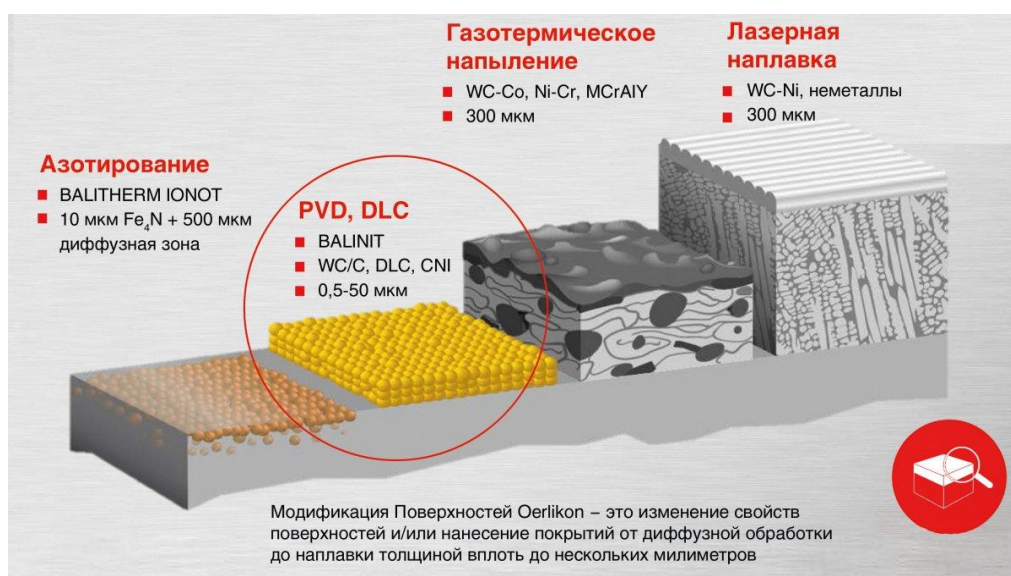


Рисунок 1.3.2 – Способы нанесения покрытий и модификации поверхностей [7]

В настоящий момент повышение износостойкости производится путем химического (CVD) или физического (PVD) осаждения покрытий (рисунок 1.3.3).

Каждый из методов имеет существенные недостатки, ограничивающие область его применения.

Недостатками метода CVD являются:

1. Высокая температура процесса. Интенсификация выделения активных реагентов приводит к охрупчиванию покрытия, снижает адгезию покрытия с подложкой и изменяет физико-механических свойства инструмента. Например, интенсивная диффузия кобальта (а частично и вольфрама) из твердосплавной основы в покрытие.

2. Растягивающие напряжения и трещины. В процессе охлаждения после осаждения в покрытии возникают растягивающие остаточные напряжения и сетка термотрещин, которые являются концентраторами напряжений и снижают усталостную прочность [72].

3. Технологическое оборудование CVD отличается большими габаритами и высокой стоимостью.

4. Процесс требует сложной системы фильтрации для предотвращения выброса опасных газов.

5. Покрытия CVD не рекомендуются для операций с ударными нагрузками, таких как черновое фрезерование или обработка труднообрабатываемых материалов.

6. Увеличение радиуса режущей кромки режущего инструмента.



Рисунок 1.3.3 – Преимущества и недостатки CVD/PVD-покрытий [40]

Основные недостатки метода PVD:

1. При испарении катодного материала образуется капельная фаза, частицы которой, осаждаясь на поверхность, ухудшают качество и однородность покрытия.
2. В процессе конденсации на острых кромках и поверхностях могут возникать микродуги, приводящие к локальной эрозии (электроэрозии) и скруглению режущей кромки, что снижает её остроту и способствует охрупчиванию.
3. Для покрытий PVD характерны высокие остаточные напряжения сжатия, которые, хотя и повышают сопротивление усталости, могут приводить к отслаиванию при недостаточной адгезии.
4. Качество покрытия PVD зависит от тщательности подготовки поверхности инструмента (очистки, активации).

Для минимизации недостатков актуальным направлением является разработка комбинированных технологий. Так, целесообразно наносить первый, прилегающий к основе слой методом PVD (например, катодно-ионным бомбардированием (КИБ), что обеспечивает высокую адгезию, а последующие слои методом CVD для придания необходимых функциональных свойств.

Одним из перспективных современных методов, позволяющих снизить температуру процесса и улучшить качество покрытия, является химическое осаждение с плазменным сопровождением (PA-CVD – Plasma-assisted Chemical Vapor Deposition) [23].

Технологическим преимуществом обладают многослойные и наноструктурированные покрытия (рисунок 1.3.4). Их износостойкость достигается за счёт синергетического эффекта от комбинации слоёв с разными свойствами: например, твёрдого износостойкого слоя и упругого демпфирующего подслоя.

Наибольшее распространение среди инструментов с PVD-покрытием получил нитрид титана и алюминия (TiAlN). Он применяется как в виде монопокрытия, так и в составе многослойных систем, часто комбинируясь с нитридом титана (TiN). Уникальные свойства покрытия TiAlN , такие как высокая

твёрдость и окислительная стабильность, достигаются за счёт варьирования соотношения титана и алюминия, а также создания наноструктур. Например, формирование нанослоистых структур с чередованием тысяч слоёв TiN и TiAlN толщиной в несколько нанометров (рисунок 1.3.5) позволяет получить материалы со значительной теплостойкостью и износостойкостью. Это позволяет применять твёрдосплавные инструменты вместо минералокерамики, сверхтвёрдых материалов (СТМ) и абразивной обработки. В частности, современные твёрдосплавные инструменты с PVD-покрытиями успешно применяются для высокоскоростной обработки сталей твёрдостью до 70 HRC (включая финишную обработку вместо шлифования), а также для резания труднообрабатываемых жаропрочных сплавов, спечённых материалов и порошковых композитов [23].

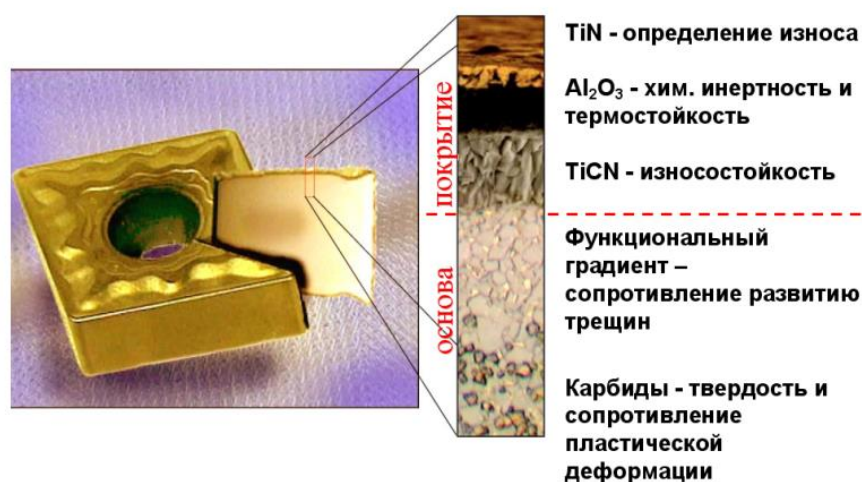


Рисунок 1.3.4 – Состав многослойных покрытий

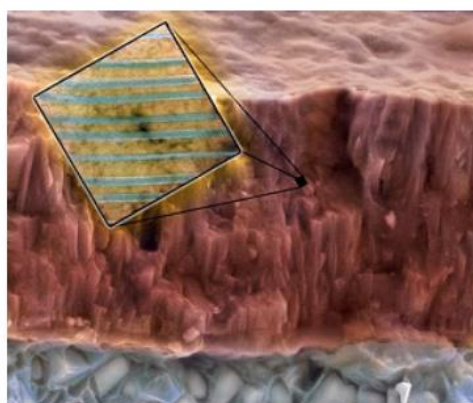


Рисунок 1.3.5 – Нанослоистые покрытия универсального твердого сплава Sandvik

Помимо TiAlN, используются и другие составы покрытий, адаптированные под конкретные задачи. Например, покрытие TiAlSiN, легированное кремнием, обладает повышенной твёрдостью и предназначено для обработки закалённых материалов. Для алюминиевых сплавов эффективно покрытие на основе нитрида циркония (ZrN, например, Garant ZOX), а для меди и её сплавов – нитрид хрома (CrN), который минимизирует адгезию и налипание [23].

Кроме того, существуют гибридные инструменты, на которых сочетаются преимущества CVD- и PVD-технологий. Ярким примером служит сверло Sandvik CoroDrill 880, где центральная и периферийная пластины имеют разные покрытия (рисунок 1.3.6). Центральная пластина с PVD-покрытием TiAlN обеспечивает стойкость в условиях ударных нагрузок и низких скоростей, тогда как периферийная пластина с CVD-покрытием на основе оксида алюминия (Al_2O_3) эффективно работает при высоких скоростях резания и температурах, обеспечивая высокую стойкость к абразивному и диффузионному износу [23].

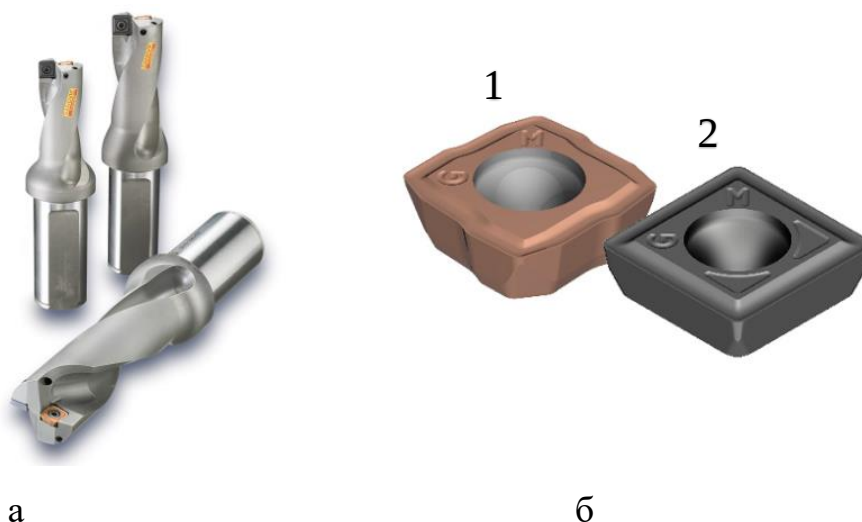


Рисунок 1.3.6 – Сверло Sandvik CD880 (а) и пластины для него (б): 1 – с PVD – покрытием; 2 – с CVD – покрытием GC1030 для фрезерования, включающие чередующие слои TiN и TiAlN

Помимо объёмного легирования и нанесения покрытий, для повышения ресурса инструмента активно применяются методы прямой модификации его поверхности. Одним из наиболее современных и динамично развивающихся

направлений является лазерная обработка. Этот метод основан на направленном тепловом воздействии концентрированного излучения на поверхностный слой, что позволяет локально изменять его структуру, фазовый состав и морфологию [76].

Наибольшее распространение получила технология лазерного термоупрочнения, но несмотря на свой потенциал, обладает рядом существенных технологических ограничений. К основным недостаткам метода относятся:

1. Неоднородность свойств упрочнённого слоя, вызванная неравномерным распределением плотности энергии в лазерном пятне. Это приводит к образованию поверхности с «чешуйчатой» микроструктурой и чередованием зон с различной степенью упрочнения и отпуска, что в ряде случаев не позволяет достичь стабильных эксплуатационных характеристик.

2. Ухудшение исходной шероховатости обработанной поверхности, что зачастую требует проведения дополнительной финишной обработки для восстановления геометрии и чистоты.

Тем не менее, лазерные технологии, такие как поверхностное легирование и лазерная абляция, рассматриваются как перспективная альтернатива или дополнение к традиционным CVD/PVD-методам. Лазерная обработка зарекомендовала себя как энергоэффективный, бесконтактный, высокопроизводительный и экологичный метод. В частности, импульсная лазерная абляция рассматривается как передовая технология для создания заданных микро- и наноструктур (функциональных поверхностей) на режущих кромках. Такие структуры способны удерживать смазку, уменьшать площадь контакта и адгезию с материалом заготовки, тем самым повышая стойкость инструмента. Ключевыми сдерживающими факторами на пути промышленного внедрения остаются обеспечение высокой надёжности, воспроизводимости результатов, масштабируемости процесса и его общей экономической эффективности.

Многообразие механизмов износа покрытий, наблюдаемое на практике, в конечном итоге детерминировано фундаментальным несоответствием физико-химических свойств материала основы (инструмента), материала покрытия и обрабатываемой заготовки. При низких и средних температурах это противоречие

проявляется в недостаточной адгезионной прочности на границе раздела «основа–покрытие». Однако ключевым технологическим барьером является поведение системы при высокотемпературном нагружении, когда на первый план выходят взаимная диффузия элементов, формирование хрупких интерметаллидных фаз и, в предельном случае, контактно-реактивное плавление на границе стружка–покрытие.

В связи с этим, центральной научно-прикладной задачей становится не столько поиск нового состава покрытия, сколько установление предсказуемых функциональных связей между наноструктурой, субструктурой и морфологией покрытия, создаваемыми на этапе его синтеза, и его эксплуатационным откликом на сложное термомеханическое воздействие. Отсутствие комплексных моделей, учитывающих кинетику изнашивания в условиях циклического нагружения, является следствием не столько сложности задачи, сколько относительно низкого эксплуатационного потолка существующих покрытий, который достигается до проявления сложных синергетических эффектов.

Таким образом, повышение ресурса инструмента требует отказа от парадигмы пассивного защитного барьера в пользу концепции активного функционального слоя. Новый подход должен быть направлен на проектирование поверхности, которая не просто изолирует основу, а целенаправленно управляет полем напряжений, потоками тепла и трением в зоне резания.

Одним из традиционных методов модификации поверхности, направленных на решение части этих задач, является диффузионное титанирование твёрдосплавного инструмента. Однако данный метод имеет существенные недостатки. Так, одновременная адсорбция титана и углерода из насыщающей среды приводит к образованию на поверхности слоя карбида титана (TiC), который не имеет прочной диффузионной связи с подложкой. Это резко снижает адгезионную прочность покрытия. Кроме того, формирующийся слой TiC, обладая высокой твёрдостью, характеризуется повышенной хрупкостью, что ограничивает его применение в условиях ударных нагрузок.

Большой вклад в решение многих задач по теории режущих материалов, конструированию режущего инструмента, повышению прочности и долговечности режущего инструмента и формированию износостойких покрытий внесли отечественные ученые.

С.В. Сизов [65] проводил исследования по повышению работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия. Было установлено влияние импульсной лазерной обработки на тепловое состояние инструмента из твёрдого сплава. Использование импульсной лазерной обработки приводит к уменьшению температур на 5,6-14,2% на передней и на задней поверхностях режущего клина. Период стойкости твердосплавных пластин увеличился в 1,39 - 1,56 раза по сравнению с режущим инструментом без импульсной лазерной обработки и в 2,47 - 4,27 раза по сравнению с инструментом с покрытием TiN в зависимости от материала заготовок и режима обработки. Промышленные испытания и технико-экономические расчеты показали, что использование режущего инструмента с многослойным покрытием после импульсной лазерной обработки способствует снижению себестоимости механической обработки за счёт снижения расходов на инструмент.

В работе А.А. Кужненко [33] разработано и оптимизировано многослойное покрытие на основе оксида алюминия и нитридов Ti, Zr, Nb, Al для режущего твердосплавного инструмента. Оптимизация архитектуры высокотемпературного многослойного покрытия, получаемого сочетанием двух методов PVD и микродугового оксидирования (МДО) позволила увеличить эксплуатационную стойкость твердосплавного инструмента более чем в 2 раза по сравнению с серийно применяемым и превысить стойкость лучших зарубежных образцов твердосплавных режущих пластин.

Проведенные производственные испытания на высокой скорости резания, показали увеличение стойкости на 75% твердосплавных инструментов с покрытием $(\text{Ti,Zr,Nb})\text{N}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в сравнении с аналогичными пластинами фирмы «Corun» (Сербия).

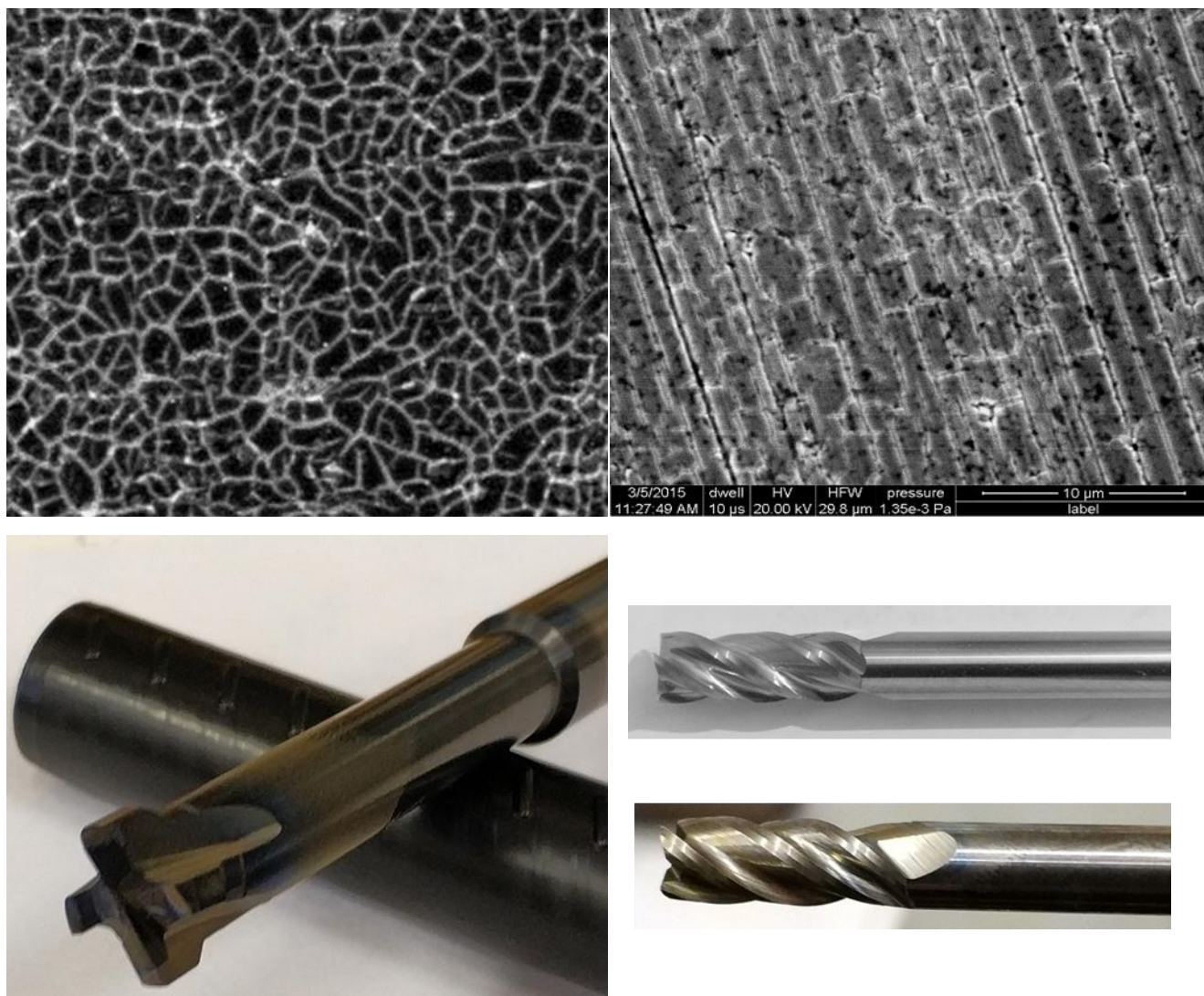
К сожалению, процесс микродугового оксидирования, несмотря на свои очевидные преимущества перед другими методами получения защитных покрытий на поверхности лёгких сплавов, не нашёл широкое промышленное применение. Последнее связано с высокой энергоёмкостью этого процесса, в частности при получении толстых (более 140 мкм) твёрдых и износостойких покрытий на поверхности изделий из алюминиевых сплавов, так как процесс проводят при относительно больших анодных напряжениях (как правило, от 220 до 750 В) и плотностях тока (как правило, от 8 до 40 А/дм²).

В работе Э.С. Мустафаева [41] представлены исследования по технологии комплексной плазменно-пучковой модификации твердосплавного инструмента, включающая обработку пучками быстрых атомов аргона и последующее нанесение износостойких покрытий TiB₂ методом магнетронного распыления, позволившая улучшить стойкость инструмента и качество обработанных поверхностей в деталях из латуни. Установлено, что составляющая силы R_y снижается на 25%, а стойкостные испытания показали, что применение комплексной плазменно-пучковой модификации поверхностного слоя микрофрез повышает их стойкость в 2 раза, обеспечивает снижение шероховатости обработанной поверхности и размеров формируемых заусенцев в сравнении с исходными микрофрезами.

В работе Е.А. Чекаловой [84] показано, что технология нанесения дискретного диффузионного покрытия на инструментальный материал, в частности на режущий инструмент позволяет: повысить износостойкость резцов с быстрорежущими пластинами в 5 раз по сравнению с пластинами без покрытия и в 3 раза по сравнению со сплошным покрытием; повысить износостойкость резцов с твердосплавными пластинами в 4 раза по сравнению с пластинами без покрытия и в 2,5 раза по сравнению со сплошным покрытием. В работе так же разработана технология нанесения покрытий на инструмент сложного профиля (рисунок 1.3.7).

Э.Э. Бобылёв [11] установил, что нанесение диффузионных титановых покрытий из среды легкоплавких жидкометаллических растворов может быть эффективно использовано для повышения работоспособности твердосплавного режущего инструмента, производительности и качества обработки. При этом,

стойкость твердосплавных пластин, имеющих диффузионные титановые покрытия может увеличиваться до 9 раз по сравнению с инструментом без покрытия, и до 1,4 раз по сравнению с инструментом, имеющим PVD покрытие. Параметр шероховатости R_a снижается в 2 раза при аналогичных режимах резания.



а

б

Рисунок 1.3.7 – Микроструктура поверхности после нанесения диффузионного дискретного покрытия (увеличение $\times 500$) а твердый сплав VK10XOM, б – быстрорежущая сталь P18

На основе критического анализа определен круг проблем, требующих решения и связанных с проблемами долговечности режущего инструмента, выбора защитных покрытий и технологии их формирования, разработкой методики

проектирования покрытий, а также оценкой влияния ее на эксплуатационные характеристики поверхностного слоя инструмента.

Можно сделать вывод о том, что в настоящее время в разработке материалов покрытий наблюдаются два подхода. Первый – это создание многослойных покрытий. Каждый слой в многослойном покрытии выполняет свою функцию и обеспечивает постепенный переход физико-механических свойств покрытия от поверхности к подложке. Второй подход заключается в создании многокомпонентных слоев переменного состава по толщине покрытия. Эти методы значительно удорожают технологию получения износостойкого покрытия и снижают надежность покрытия, ведь дефект одного из слоев приводит к снижению качества всего покрытия. Многочисленные материалы и способы нанесения покрытий имеют свои преимущества и недостатки. Поэтому естественно стремиться к разработке не «универсальных» покрытий и способов их нанесения, а покрытий, рассчитанных на конкретные базовые материалы и определенные условия эксплуатации.

Модифицирующие покрытия удерживают лидирующие позиции, как один из наиболее эффективных и актуальных способов существенного повышения основных эксплуатационных возможностей современного металлорежущего инструмента. К сожалению, современные способы получения покрытий, несмотря на свои очевидные преимущества имеют следующие недостатки: высокая стоимость инструмента, высокая энергоёмкость, в частности при получении толстых, твёрдых и износостойких покрытий; возникновение растягивающих напряжений; низкая адгезия; неоднородная толщина покрытия; охрупчивание покрытия и т.д.

Перспективными технологиями получения функциональных поверхностей на режущем инструменте, является лазерная обработка и нанесение дискретных диффузионных покрытий. Улучшение характеристик материала поверхности инструмента путем создания регулярных микро- и наноструктур импульсной лазерной обработкой (абляцией) позволит увеличить твёрдость поверхности инструмента и уменьшить коэффициент трения с обрабатываемым материалом, что

способствует увеличению периода устойчивого износа инструмента. Однако существует вероятность возникновения термомеханических напряжений в поверхностном слое материала, возникающих в процессе обработки из-за расширения и сжатия материала при нагреве и охлаждении

Существенное повышение долговечности режущего инструмента требует разработки методов формирования функционального слоя нового поколения, направленное не только на создание защитного слоя, но и на целенаправленное управление свойствами всей системы «основа–покрытие». Приоритетными задачами становятся увеличение её прочности и жесткости, а также активное подавление циклических термомеханических напряжений в зоне резания.

Перспективным направлением является создание диффузионных покрытий, формирующие переходный слой с градиентом свойств. Такое покрытие обеспечивает перераспределение напряжений, повышает общую прочность и жесткость инструмента [45, 83]. Ключевым преимуществом метода локального диффузионного насыщения является релаксация напряжений в поверхностном слое. Подобное перераспределение напряженного состояния повышает трещиностойкость самого покрытия. Эффект достигается за счет формирования ячеистой микроструктуры с чередованием зон, модифицированных покрытием и свободных от него, где границы этих зон служат препятствиями для развития поверхностных дефектов [84].

Предлагается новый комбинированный метод модифицирования режущего инструмента, синтезирующий преимущества отдельных технологий для взаимной компенсации их недостатков. В этой связи ключевыми научно-техническими задачами становятся:

1. Выявление и установление количественных закономерностей, связывающих технологические параметры формирования функциональных покрытий с эксплуатационными характеристиками инструмента (износостойкость и ресурс).

2. Разработка и комплексное исследование новых комбинированных методов, обеспечивающих синергию высоких режущих свойств, активной

релаксации термомеханических напряжений и эффективного торможения поверхностного растрескивания.

Предлагаемый комбинированный метод решает фундаментальную проблему совмещения высокой поверхностной твёрдости и термостойкости покрытия с необходимой пластичностью и вязкостью инструментальной основы.

Основными сдерживающими факторами для успешного перехода к промышленным производственным процессам являются надёжность, повторяемость, масштабируемость и эффективность процесса структурирования.

Выводы по главе

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы показал, что износ металлорежущего инструмента носит комплексный характер. Основными факторами падения стойкости инструмента являются абразивный износ, адгезионные процессы и термическая деградация материала. Особенно критично комплексное воздействие высоких температур и механических нагрузок, приводящее к ускоренной потере эксплуатационных характеристик.

Современные методы упрочнения демонстрируют различную эффективность. Нанесение защитных покрытий позволяет существенно повысить износостойкость, однако каждый из существующих методов имеет принципиальные ограничения. Физические методы осаждения обеспечивают умеренное увеличение ресурса, тогда как химические методы, несмотря на более высокую эффективность, приводят к нежелательному изменению свойств основного материала.

Наибольший практический интерес представляют комбинированные технологии обработки. Сочетание лазерной модификации поверхности с нанесением дискретных покрытий показало принципиально новые возможности. Такой подход позволяет одновременно решать проблемы адгезии покрытий и

термостойкости инструмента при совмещении высокой твёрдости и термостойкости поверхности инструмента с пластичностью основы.

Перспективным направлением развития является разработка параметров комбинированной обработки и оптимизации процессов. Особое внимание следует уделить согласованию режимов лазерной абляции с характеристиками наносимого покрытия. Многослойные структуры с градиентными свойствами открывают дополнительные возможности для управления эксплуатационными характеристиками.

Ключевым результатом анализа является формулировка гипотезы комплексного подхода к модификации поверхности. Совместное использование лазерной обработки и дискретных диффузионных покрытий создает принципиально новые возможности для существенного увеличения срока службы режущего инструмента без снижения его прочностных характеристик.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

Современные технологии машиностроения предъявляют повышенные требования к износостойкости и стойкости режущего инструмента, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные сплавы и композиты. Традиционные методы поверхностного упрочнения, включающие сплошные покрытия и объемную термообработку, зачастую не обеспечивают необходимого сочетания высокой твердости поверхностного слоя и ударной вязкости основы, что приводит к преждевременному выходу инструмента из строя [15, 17, 71, 72]. В этой связи актуальным направлением исследований является разработка комбинированных методов обработки, сочетающих преимущества лазерной абляции и нанесения дискретных диффузионных покрытий. Лазерная абляция позволяет формировать на поверхности инструмента заданную микроструктуру, что не только улучшает адгезию последующих покрытий, но и способствует релаксации термических напряжений за счет создания зон с контролируемой шероховатостью и остаточными сжимающими напряжениями [10, 70, 87, 89, 98, 123, 126, 127, 129]. В свою очередь, дискретные диффузионные покрытия, нанесенные на подготовленную поверхность, обеспечивают локальное повышение износостойкости без существенного увеличения хрупкости инструмента [1, 84]. Синергетический эффект такого комбинированного воздействия заключается в сочетании механизмов упрочнения: микролегирования поверхности при лазерной обработке и образования термодинамически стабильных фаз при нанесении покрытия.

Теоретической основой данного подхода являются исследования в области взаимодействия лазерного излучения с металлическими поверхностями, а также закономерностей диффузии элементов в условиях локального нагрева. Ключевыми аспектами являются моделирование тепловых потоков при абляции, анализ кинетики формирования переходного слоя между покрытием и основой, оценка

влияния дискретной структуры покрытия на распределение напряжений в зоне резания. Решение этих задач требует комплексного использования методов математического моделирования, включая конечно-элементный анализ и моделирование молекулярной динамики, а также экспериментальных исследований с использованием современной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

Таким образом, теоретическое обоснование комбинированного метода модификации поверхности режущего инструмента направлено на решение следующих задач: установление количественных взаимосвязей между технологическими параметрами (энергия лазерного излучения, состав и геометрия дискретного диффузионного покрытия) и характеристиками формируемого поверхностного слоя (твердость, шероховатость, микрорельеф, химический состав, температура и толщина); экспериментальную идентификацию этих зависимостей; а также оценку влияния данных параметров на ключевые эксплуатационные свойства инструмента (износостойкость, термостойкость и адгезионную прочность покрытия). Полученные результаты позволят оптимизировать технологический процесс обработки и разработать рекомендации для промышленного внедрения, что является важным шагом в повышении эффективности металлообрабатывающего производства.

2.1 Принципы лазерной абляции и их применение для изменения поверхности инструментов

В отличие от обычных источников света, где, фотоны испускаются во всех направлениях, лазерное излучение характеризуется тремя фундаментальными свойствами: монохроматичностью (излучение имеет практически одинаковую длину волны); когерентностью (все фотоны колеблются в одной фазе); направленностью (излучение распространяется в строго заданном направлении с минимальной расходимостью пучка) [14, 19, 35, 36].

Эти уникальные свойства позволяют с высокой точностью передавать энергию фотонов в строго локализованную зону и вызывать контролируемые физико-химические превращения в материале.

При изучении воздействия лазерного излучения на материалы выделяют три группы ключевых факторов, определяющих характер взаимодействия излучения с веществом при структурировании поверхности [14, 19, 35, 36]:

1. Свойства обрабатываемого материала: оптические характеристики (коэффициенты отражения и поглощения); теплофизические параметры (температуропроводность, теплопроводность, теплоемкость, критические температуры, температура фазовых превращений).

2. Параметры лазерного излучения: энергетические характеристики (мощность и удельная мощность); спектральные свойства (длина волны); временные параметры (длительность и частота импульса).

3. Технологические условия обработки: кинематические параметры (скорость луча); геометрические характеристики (положение фокальной плоскости, диаметр пятна, фокусное расстояние); параметры технологической среды (состав, давление и скорость подачи газа).

2.2 Построение основных закономерностей и взаимосвязей параметров определяющих технологический процесс получения микро- и наноструктур методом лазерной абляции

На процесс лазерной обработки влияют параметры лазера и свойства материала (например, поглощение, время релаксации электронов, связующее вещество и размер зерна). Так, теплопроводность зависит от размера зерна и увеличивается с его ростом. С учетом правила Видемана-Франца между электро- и теплопроводностью для металлов, где преобладает электронная составляющая, последняя при изменении химического и фазового состава и структуры сплава будет изменяться по тем же закономерностям, что и электропроводность. Состав

связки также влияет на процесс лазерной абляции. Исследования по лазерной абляции сверхтвердых материалов с различным содержанием связующего кобальта (10% и 12%) показали, что при более низком процентном содержании связующего вещества наблюдается большее плавление поверхности, что обеспечивает лучшую шероховатость поверхности.

Ключевым параметром лазерной обработки является плотность мощности, которая представляет собой количество энергии, излучаемой на площадь материала [14] и выраженное в уравнении 2.2.1.

$$E_{\text{пор}} = \frac{P}{S}, \quad (2.2.1)$$

где $E_{\text{пор}}$ – пороговая плотность мощности Вт/см^2 , P – мощность излучения, Вт , S – площадь лазерного пятна, см^2 .

Однако необходимо учитывать такие специфические свойства как монохроматичность и когерентность. Такие искажения как (сферическая абберация, астигматизм, кома) вносимые оптическими элементами и дифракционная расходимость луча, приводит к тому, что площадь лазерного пятна S увеличивается и выражается как:

$$S \sim \Theta f, \quad (2.2.2)$$

где Θ – суммарная расходимость лазерного излучения; f – фокусное расстояние линзы.

Лазерное создание микро и наноструктур на режущем инструменте включает в себя создание поверхностных элементов для улучшения характеристик резки. Одной из задач является исследование влияния излучения лазера наносекундной длительности на целостность получаемой поверхности инструмента, желаемую геометрию поверхности [112], качество поверхности [92], характеристики износа [120], а также результирующие трибологические изменения.

В таблице 2.2.1 приведены все соответствующие параметры лазерной установки и показатели качества и эффективности при структурировании рабочей поверхности режущих инструментов, указанные в этой работе для построение

основных закономерностей и взаимосвязей процесс получения микро- и наноструктур методом лазерной абляции.

Таблица 2.2.1 – Основные задающие параметры лазерной обработки, связанные со структурированием поверхности режущих инструментов

Параметры лазера	Характеристики структуры	Показатель качества полученных структур	Показатель эффективности
Длина волны, Длительность импульса, Скорость обработки, Мощность, Источник	Геометрия структуры, Глубина, Ширина, Соотношение ширины и площади, Плотность структуры, Наноструктуры	Глубина резания, Материал заготовки, Шероховатость поверхности Скорость резания	Коэффициент фрикционно-адгезионного износа

2.2.1 Влияние длины волны и типа лазера на механизм лазерной абляции

Длина волны определяет механизмы поглощения и поведение материала при поглощении излучения. Электрофизические превращения обычно происходят в условиях термодинамического равновесия, где теплопередача (закон Бера-Ламберта, уравнение (2.2.3) и законы механики жидкости и газов определяют поведение расплавленного материала.

$$I(z) = AI_0 \exp^{-Kz}, \quad (2.2.3)$$

где $I(z)$ – интенсивность лазерного луча на глубине z , A – поглощательная способность материала $A=e=1-R$ (e — степень черноты, R — коэффициент отражения), I_0 – интенсивность лазерного луча на поверхности, K – коэффициент поглощения материала.

Объектом нашего исследования является режущий инструмент, который изготавливаются из разных классов материалов, поэтому необходимо

исследование в области взаимодействия лазерного излучения с металлами и неметаллами.

При поглощении существует сильная зависимость коэффициента поглощения света a от длины волны, что видно из формулы 2.2.4.

$$a = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.2.4)$$

где λ – длина волны лазерного луча, k – теплопроводность.

Из анализа данных по поглощательной способности материалов в работах [26, 27, 47, 60] установлено, что лазерные установки, работающие на длине волн в диапазоне 488–1064 нм можно применить для абляции твердых и тугоплавких материалов из-за максимального поглощения (рисунок 2.2.1).

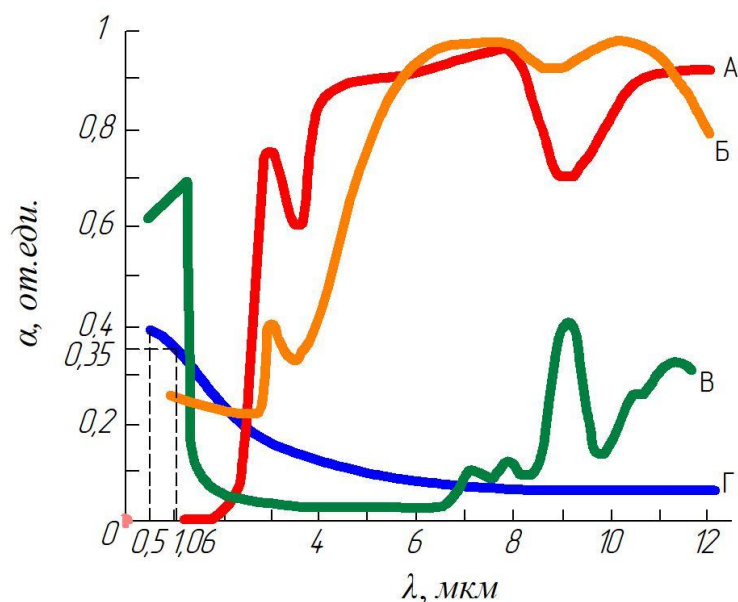


Рисунок 2.2.1– Зависимость коэффициента поглощения лазерного излучения от длины волны для материалов: А – стекло, Б – глиноземная керамика, В – кремний, Г – железо

2.2.2 Влияние энергетических параметров на механизм лазерной абляции

К числу ключевых энергетических параметров лазерного воздействия относятся мощность излучения P (для лазеров непрерывного действия) и энергия в

импульсе $W_{\text{и}}$ (для лазеров импульсного или импульсно-периодического действия). Эти параметры являются определяющими, поскольку именно через них обеспечивается требуемая плотность мощности (энергии) на поверхности обрабатываемого объекта E_f , о которой говорилось ранее. Связь между ними может быть выражена как:

$$E_f = \frac{P}{S} = \frac{W_{\text{и}}}{\tau S}, \quad (2.2.5)$$

где τ – длительность импульса, с.

Эффективность процесса повышается за счет многофотонного поглощения [113]. Когда передаваемая энергия достигает значений, превышающих пороговую плотность мощности, материал заготовки подвергается абляции [14, 35, 36, 47, 92, 112, 120]. Испарение, давление отдачи и сублимация, вызванная процессом, вытесняют материал, образуя поверхностные элементы (рисунок 2.2.2).

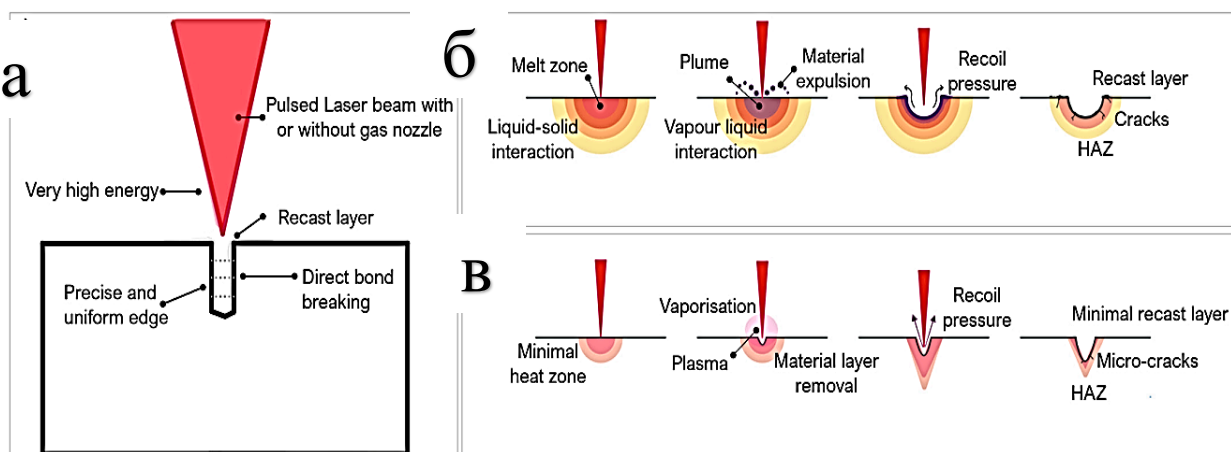


Рисунок 2.2.2 – Процесс абляции: а – структурная схема процесса; б – процесс абляции при плотности мощности равной порогу абляции материала; в – процесс абляции при плотности мощности намного больше порога абляции материала

С помощью лазерного излучения возможно создавать структуры с геометрическими параметрами порядка 10–100 мкм [113]. В особых случаях можно создать наноразмерные элементы, известные как лазерно-индуцированные периодические поверхностные структуры [95].

Формула 2.2.6 указывает на то, что при малой средней мощности $\langle P \rangle$ можно обеспечить необходимую степень воздействия при короткой длительности воздействия τ .

$$W_{\text{и}} = \frac{\langle P \rangle}{f\tau}, \quad (2.2.6)$$

Длительность воздействия τ относится к пространственно-временным характеристикам. Важность данного параметра заключается в том, что он позволяет контролировать процесс обработки. Реакция материала на импульс различной длительности зависит от пороговой плотности мощности, глубины проникновения энергии и времени обработки (формула 2.2.5). Если длительность импульса короче времени релаксации, проводимость энергии ограничивается глубиной оптического проникновения, а не тепловой глубиной, что выгодно при микрообработке, поскольку не изменяет микроструктуру. Следовательно, при условии, что энергия импульса превышает энергию связи решетки, решетчатая связь мгновенно разрывается без какого-либо переноса энергии к соседним ионам [117].

Длительность импульса изменяет количество энергии выделяемой и распределяемой по материалу (рисунок 2.2.3) [114]. Как и длина волны, она влияет на поведение поглощения. В наносекундном ($нс$) режиме наблюдается линейное поглощение, которое постепенно меняется на нелинейное поглощение в фемтосекундном ($фс$) режиме [107].

У лазерных установок с непрерывным излучением эффективное время воздействия выражается формулой:

$$\tau = \frac{d_0}{V_{\text{ск}}}, \quad (2.2.7)$$

где d_0 – диаметр пятна излучения в фокусной плоскости, $м$, $V_{\text{ск}}$ – скорость сканирования (обработки), $м/с$.

Кроме того, для создания правильной структуры поверхности должна быть достигнута благоприятная скорость лазерной обработки. Плотность энергии должна быть установлена так, чтобы минимизировать количество проходов лазера, поскольку это может вызывать множественные циклы нагрева и охлаждения в

микроструктуре. Оптимизация параметра плотности потока энергии может обеспечить формирование однородной микроструктуры.

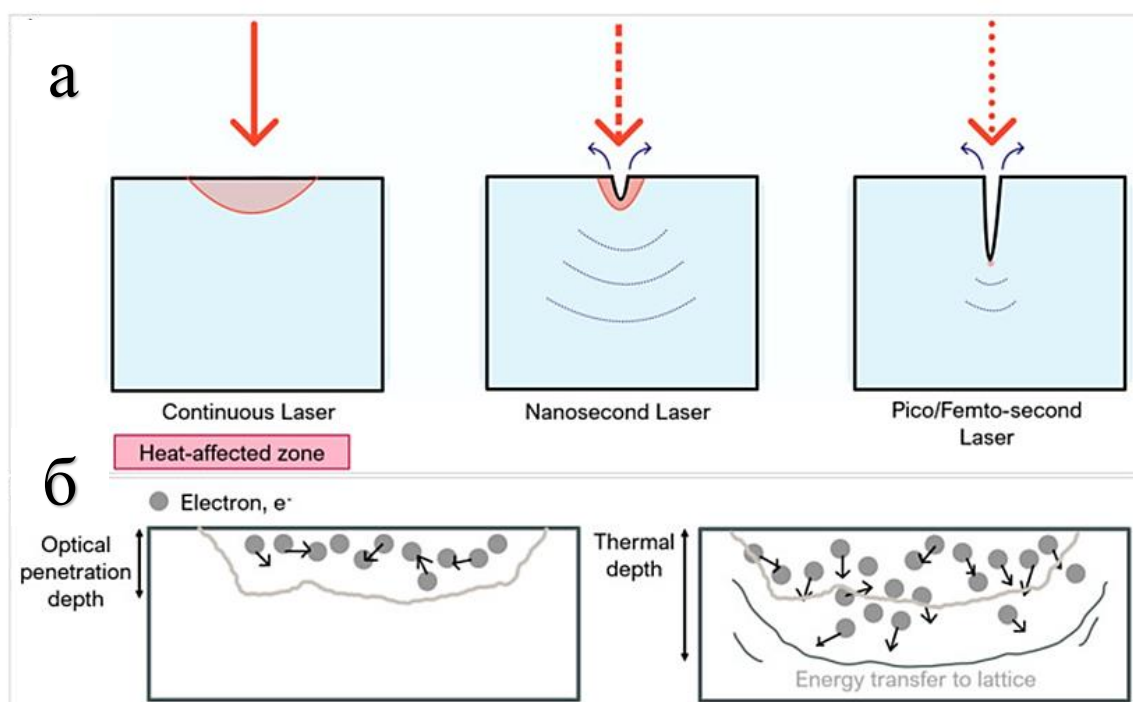


Рисунок 2.2.3 Длительность импульса: а – адаптированная схема влияния длительности импульса на поверхность материала. Ударные волны показаны синими пунктирными линиями. Более короткая длительность импульса свидетельствует о вытеснении материала; б – перенос энергии электронов на глубине оптического проникновения по сравнению с тепловой глубиной

2.2.3 Влияние технологических условий обработки

Технологические условия лазерной обработки определяются совокупностью трёх основных системных компонентов: параметрами фокусирующей оптической системы, устройством формирования и подачи технологического газа, а также характеристиками координатного устройства.

Фокусирующая оптическая система, предназначенная для формирования на поверхности материала светового пятна заданных размеров и плотности энергии,

характеризуется следующими ключевыми параметрами: фокусным расстоянием f , показателем преломления материала линзы n ; радиусами кривизны оптических поверхностей. Важным технологическим параметром является также положение плоскости минимального перетяжки пучка Δf относительно облучаемой поверхности [19].

Поскольку перечисленные оптические характеристики линзы зависят от длины волны излучения λ , они тесно взаимосвязаны с исходными параметрами лазерного пучка. К последним относятся: угловая расходимость Θ , диаметр луча на выходе из резонатора (апертура) d , поперечная модовая структура TEM_{mn} и поляризация излучения $\vec{E}$.

Механизм лазерной обработки так же зависит от кинематики взаимодействия лазер–деталь. Эффективность поглощения лазерной энергии, а также геометрия зоны воздействия при обработке с перекрытием импульсов, напрямую зависят от угла падения излучения на поверхность материала.

Скорость обработки влияет на то, как долго заготовка подвергается воздействию лазерного луча в определенной области (формула 2.2.5). Параметр скорости необходимо оптимизировать с учетом характеристик материала и лазерного луча, чтобы обеспечить достаточную передачу энергии для достаточно равномерного удаления материала с наименьшим повреждением поверхности и может быть определена только экспериментально [13]. Но необходимо так же помнить, что высота удаленного слоя h , зависит от мощности в импульсе, и чем меньше τ , тем меньше толщина слоя испаренного при воздействии одного импульса.

В современной обработке материалов синтетического алмаза и кубического нитрида бора используются скорости подачи от 2 мм/с до 900 мм/с [109, 128]. В работе [118] использовали наносекундный лазер на трёх скоростях при плотности мощности 11,8 Дж/см² для создания микроканалов на карбиде вольфрама с кобальтовой связкой (рисунок 2.2.4 а). Самая высокая скорость проникла только в самые верхние поверхностные слои, но все же передала достаточно энергии, чтобы

вызвать разбрызгивание материала по текстуре. По мере снижения скорости глубина канавки увеличивалась с более четкой формой структуры.

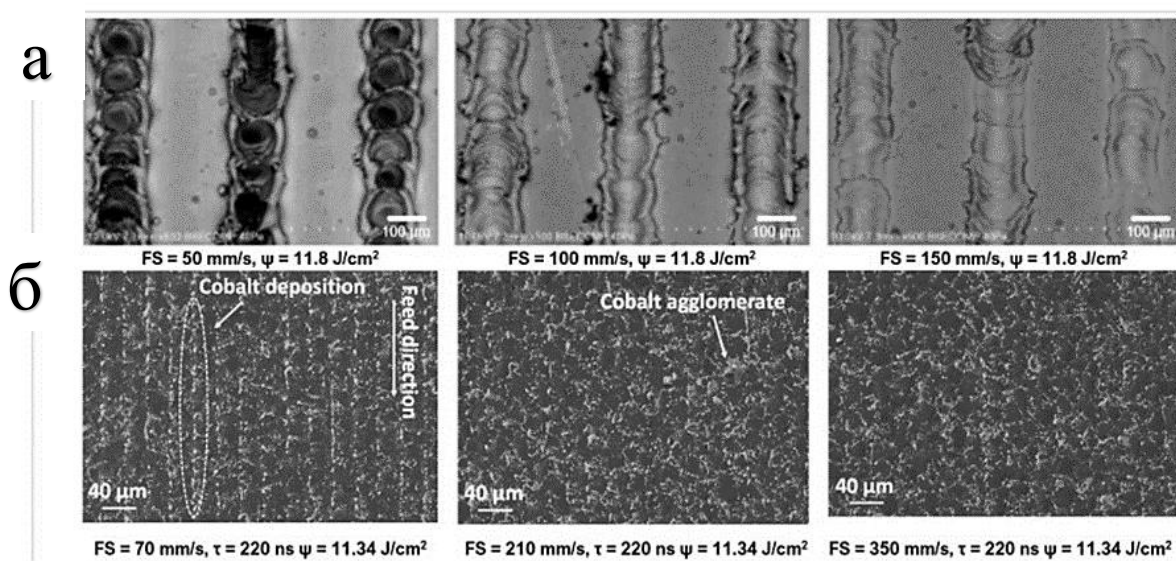


Рисунок 2.2.4 – Металлографические исследования поверхности: а – микроканавки на поверхности WC-Co при разных скоростях обработки; б – Поверхность синтетического алмаза с помощью сканирующего электронного микроскопа при различных скоростях обработки: 70 мм/с дает $Ra = 0,5$ мкм, 210 мм/с дает $Ra = 0,41$ мкм

Ряд комплексных параметров, которые так же характеризуют технологический процесс, зависят от некоторых перечисленных ранее величин зависящий от фокусирующей оптики, длины волны и диаметра излучения, вышедшего из резонатора.

Современные лазерные установки позволяют получить диаметр сфокусированного лазерного пятна при длине волны 1064 нм в диапазоне 10 – 100 мкм. Соответственно, размер структур, получаемых на режущем инструменте, будет зависеть от длины волны излучения и оптических параметров установки.

Ряд вышеотмеченных комплексных параметров определяет итоговые показатели обработки, которые можно охарактеризовать как показатели эффективности и качества. В результате, разработана схема взаимосвязей параметров определяющих технологический процесс получения структур методом

лазерной абляции (рисунок 2.2.5). Из схемы видно, что плотность мощности излучения E_f играет роль коэффициента передачи по каналу обратной связи, что дает возможность, изменяя мощность и количество импульсов, управлять поведением системы.

Основываясь на анализе литературы, обоснование выбора параметров лазера и размера структуры по-прежнему основано на методе проб и ошибок/статистическом подходе для определения наилучшего диапазона настроек для создания микроструктур. Статистические подходы полезны для определения значимости факторов во время обработки. Взаимодействие между лазером и заготовкой относительно короткое и сложное, что затрудняет точное предсказание поведения для достижения желаемой целевой текстуры. Поэтому методы оптимизации и моделирования для широкомасштабного производства постоянно разрабатываются и пересматриваются. Численное моделирование показало успех в прогнозировании результатов лазерной обработки. В работе [116] продемонстрировали численное моделирование с использованием пространственно-частотного анализа и дифференциальных уравнений для моделирования теплопередачи для прогнозирования шероховатости поверхности с ошибкой от 10 до 15%.

Численное моделирование фокусируется на понимании фундаментальной передачи энергии и поведенческих свойств используемого лазерного луча и материала заготовки, тогда как искусственный интеллект не требует интеграции материаловедения для формулирования прогнозирующей модели; методы часто называют черными ящиками, поскольку внутренние слои моделирования скрыты. Однако они способны обрабатывать большие наборы данных; они оказываются менее чувствительными к изменениям параметров и более точными. Эти модели могут быть использованы в промышленности для изменения свойств материалов инструмента с помощью параметров лазера. Это будет особенно полезно при работе с твердыми и сверхтвердыми материалами, стоимость производства которых чрезвычайно высока.

Задающие параметры

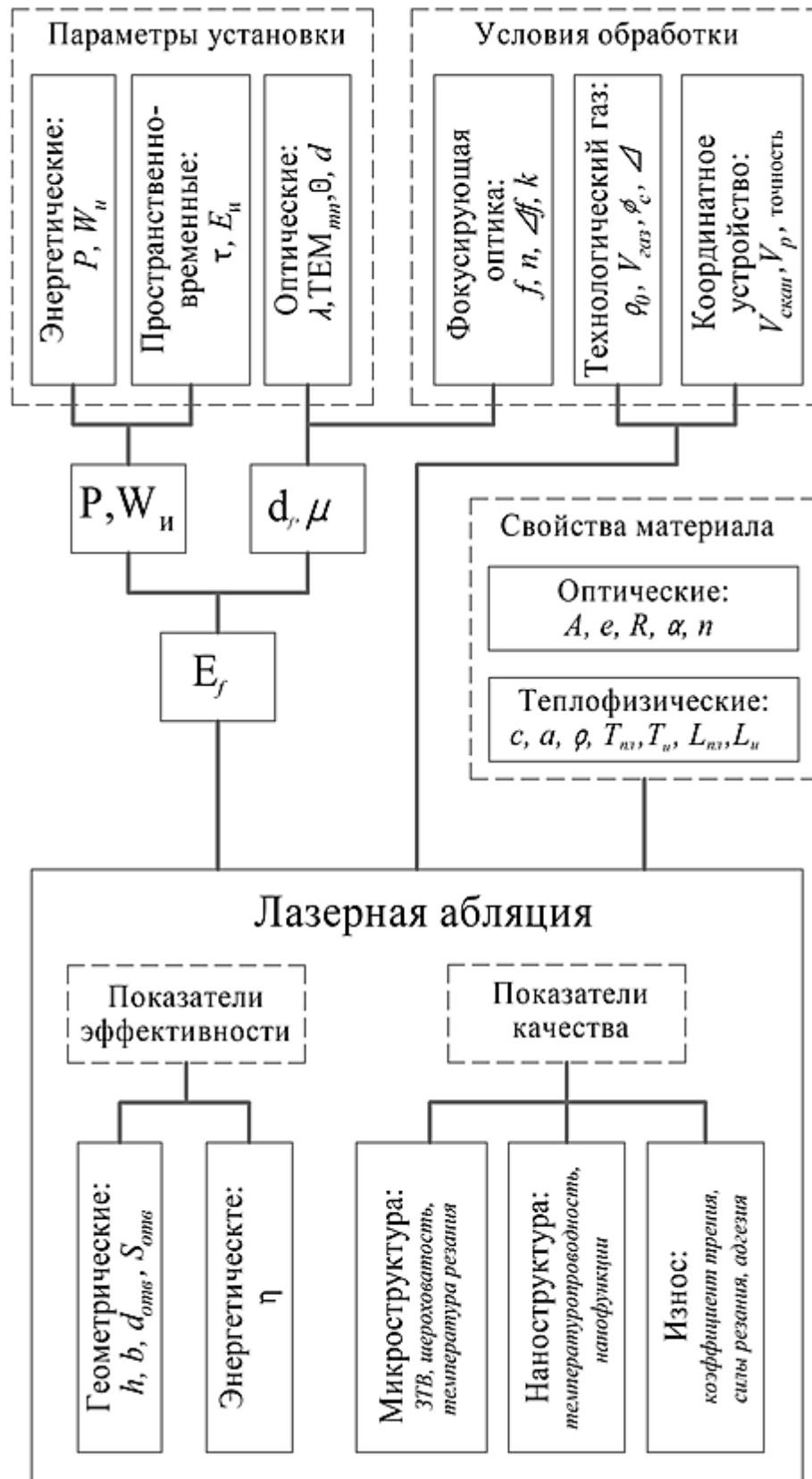


Рисунок 2.2.5 – Схема задающих параметров технологического процесса лазерной обработки, влияющих на формирование микро- и наноструктур

2.3 Формирование дискретных диффузионных покрытий

Хрупкое разрушение режущего инструмента без заметной пластической деформации является преобладающим механизмом разрушения [15]. В этом контексте стойкость инструмента, определяемая как время работы до хрупкого разрушения, является ключевой прочностной характеристикой материала. Согласно кинетической теории прочности эта характеристика может быть описана формулой Журкова [53], что подтверждается исследованиями покрытий контактных площадок инструмента [15].

Принципиальное значение имеет различие прочностных свойств материала и готового изделия. Формула Журкова, будучи эффективной для описания свойств материала, не учитывает конструктивные особенности инструмента, масштабный эффект и влияние рабочей среды. Это ограничение подчеркивает необходимость разработки новых подходов к оценке долговечности.

Перспективным направлением является рассмотрение дискретного диффузионного покрытия как объемного модификатора свойств инструментального материала [15, 84]. Ячеистая структура покрытия обеспечивает:

1. Снижение эффективного модуля упругости композиции «покрытие-основа».
2. Улучшение условий релаксации напряжений.
3. Повышение стойкости к распространению трещин.

Теоретическое моделирование показывает, что локальный характер покрытия сохраняет пластичность основы, компенсирует разницу коэффициентов термического расширения и снижает склонность к упругим прогибам.

Необходимо учитывать имеющиеся ограничения кинетической теории прочности [53], в том числе:

1. Отсутствие единой теоретической базы
2. Значительный разброс экспериментальных данных (до 100 раз) [46]

3. Противоречие между статистическим подходом Вейбулла и детерминизмом формулы Журкова

Таким образом, применение локальных диффузионных покрытий является эффективным методом повышения ресурса режущего инструмента, сочетающим в себе преимущества материаловедческого подхода с учетом конструктивных особенностей изделия [84].

2.4 Физико-химические закономерности формирования дискретного диффузионного покрытия

Метод диффузионного насыщения поверхности с использованием молекул и ионов, активированных электрическим коронным разрядом в сжатом воздухе, демонстрирует ряд существенных преимуществ перед традиционными методами насыщения из парогазовой фазы [84]. К ним относятся:

1. Повышенная скорость массопереноса и, как следствие, скорость насыщения.
2. Возможность проведения термодиффузионного процесса без предварительной операций по удалению оксидных плёнок (депассивации);
3. Полная экологическая безопасность процесса, исключающая использование токсичных газов и сложных систем их утилизации.

Проведённый анализ характера и причин отказов режущего инструмента подтверждает, что локальное диффузионное покрытие оказывает существенное влияние на увеличение ресурса как самого инструмента, так и на качество обрабатываемых деталей. Согласно исследованиям [24, 34, 80], в условиях повышенных термомеханических нагрузок определяющую роль играть ячеистая (дискретная) структура покрытия, которая напрямую влияет на его трещиностойкость, усталостную прочность и, в конечном итоге, на срок службы. В связи с этим в данной работе особое внимание уделено изучению механизмов

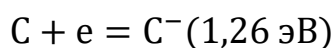
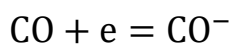
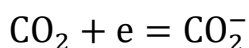
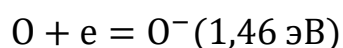
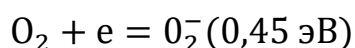
формирования и функциональной роли именно такой локальной дискретной структуры.

Значительное технологическое упрощение процесса нанесения плазменных покрытий достигается при использовании газового разряда при атмосферном давлении. В данном случае процесс основан на диффузионном насыщении поверхности высокоактивными ионами, образующимися при активации воздушного потока униполярным коронным разрядом. Такой подход позволяет существенно снизить энергозатраты (отпадает необходимость в создании и поддержании вакуума) и упростить технологическое оборудование, делая метод более доступным для внедрения.

Химический состав атмосферного воздуха (азот, кислород, диоксид углерода) создаёт условия для совместного синтеза в формирующемся покрытии твёрдых фаз различной природы: нитридных, оксидных и карбидных. Эти соединения способствуют повышению эксплуатационных характеристик покрытия, в том числе его износостойкости и термостойкости [84].

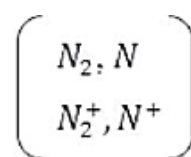
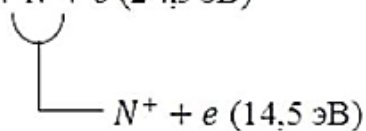
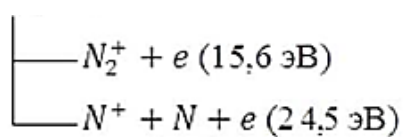
Основу ионной активации воздуха составляют:

- процессы электронного сродства с образованием отрицательных ионов (в скобках приведены примеры высвобождаемой энергии сродства):

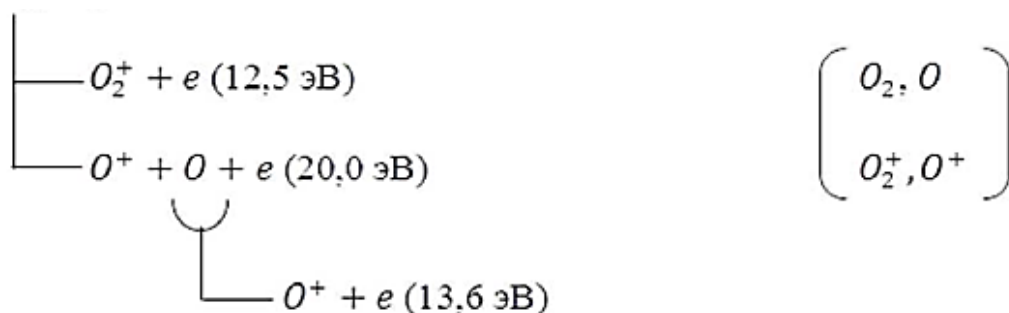


- процессы ионизации с образованием положительных ионов (в скобках указаны пороговые энергии ионизации):

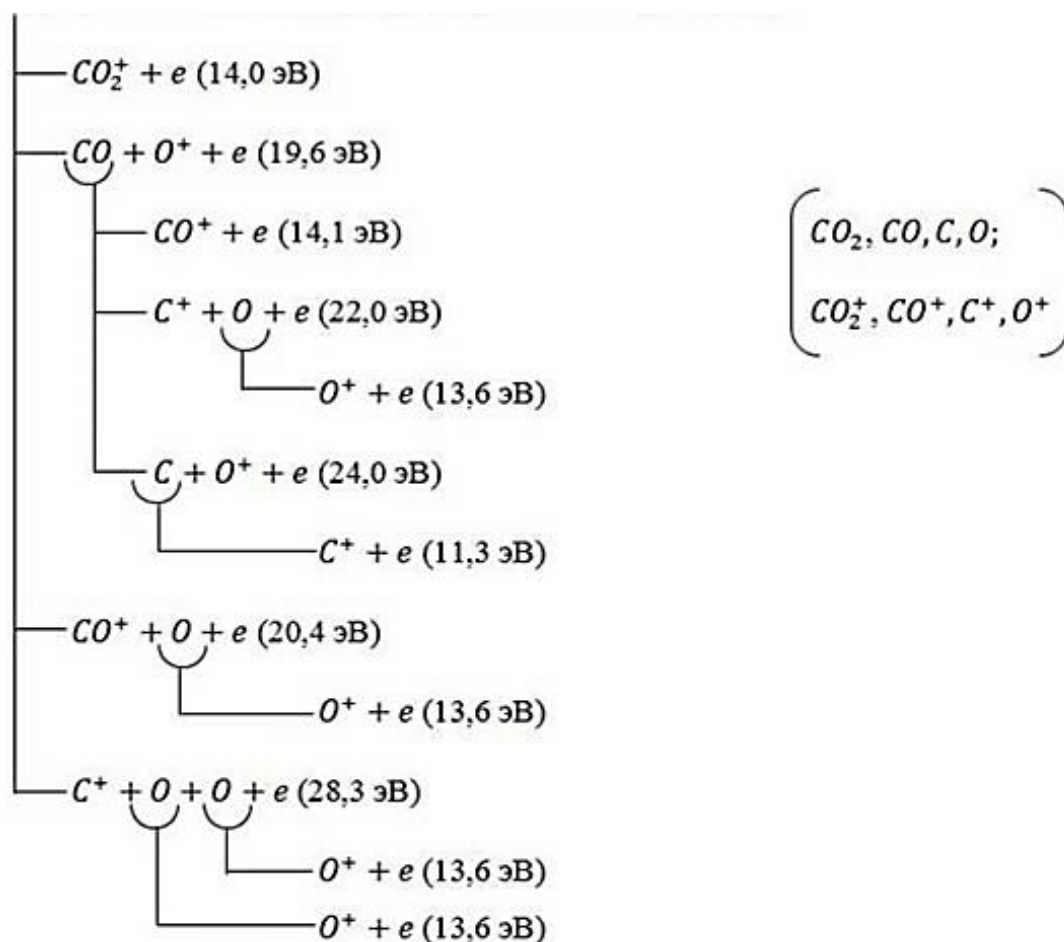
1) N_2 ; 78,084 %



2) O_2 ; 20,9476 %



3) CO_2 ; 0,0314 % – двуокись углерода (CO – окись углерода)



В процессе ионизации воздуха в коронном разряде преобладают положительные ионы, что обусловлено неспособностью азота образовывать стабильные отрицательные ионы. Высокая электроотрицательность кислорода способствует его активной хемосорбции на поверхности инструмента, что приводит к формированию первичной оксидной плёнки. Эта плёнка играет ключевую роль в последующем формировании покрытия, выполняя две основные функции: она выступает как диффузионный барьер, подавляющий процессы

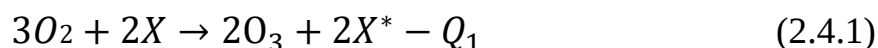
нитридообразования, и как каталитическая подложка, создающая благоприятные условия для преимущественной диффузии атомарного кислорода вглубь материала. В результате в приповерхностном слое формируется оксидное покрытие с преобладанием фаз на основе оксидов железа и легирующих элементов. Содержание диоксида углерода (CO_2) в атмосферном воздухе является недостаточным для оказания существенного влияния на фазовый состав и кинетику роста формирующегося слоя в рамках данного процесса.

Помимо ионов, в зоне разряда присутствуют высокоактивные нейтральные продукты плазмохимических реакций, в первую очередь озон (O_3) и перекись водорода (H_2O_2), являющиеся сильными окислителями. Их образование происходит за счёт энергии разряда в ходе диссоциативно-рекомбинационных процессов. При этом данные соединения представляют собой двойную технологическую проблему: 1) они опасны для здоровья оператора при превышении предельно допустимой концентрации (ПДК) в воздухе рабочей зоны; 2) их высокая окислительная способность создаёт потенциальную пожароопасность.

Кинетика образования и распада озона описывается системой конкурирующих реакций с участием «третьего тела» (молекул O_2 или N_2), которые регулируют переход между атомарным и молекулярным кислородом. Процесс является энергоёмким: энтальпия образования озона (ΔH) составляет +142,5 кДж/моль, а энергия, необходимая для разрыва связи $\text{O}-\text{O}_2$ в молекуле озона, равна 106,7 кДж/моль, что объясняет его термическую нестабильность и необходимость строгого контроля параметров разряда.

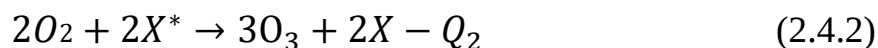
Эти процессы могут быть описаны следующими последовательностями реакций:

1. Эндотермический цикл образования озона (с поглощением энергии):



где X – поверхностный центр или катализатор, Q_1 – суммарная энергия, затрачиваемая на возбуждение частиц и образование озона (~498 кДж/моль).

2. Экзотермический цикл разложения озона (с выделением энергии):



где Q_2 – энергия, выделяющаяся при релаксации возбуждённых состояний и разложении озона (~ 498 кДж/моль).

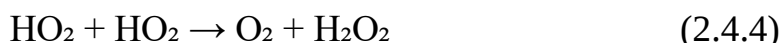
Представленная схема реакций является условно сбалансированной и включает ключевые энергетические параметры: энергию диссоциации связи O–O (498,4 кДж/моль) и разницу энтальпий образования и распада озона (35,8 кДж/моль). В рамках атомно-молекулярного подхода базовый процесс образования озона описывается упрощённой реакцией:



где «третье тело» (X) не указано, но играет решающую роль в стабилизации озона. Его предельно допустимая концентрация (ПДК) в воздухе рабочей зоны составляет $10^{-5} \%$ ($0,123 \text{ мг/м}^3$) [9].

Основной механизм образования H_2O_2 в атмосфере включает:

1. Рекомбинация радикалов гидроперекиси:



2. Образование HO_2 через реакцию OH с O_3 :



В тропосфере концентрация радикалов OH составляет $(0,5-5) \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ ($1,96-19,6 \cdot 10^{-12} \%$ от стандартной плотности $n_c = 2,547 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$) [9]. В газовом разряде возможен альтернативный путь:



с последующим каскадом (2.4.3)→(2.4.2)→(2.4.1). Однако прямое образование H_2O_2 через $2OH \rightarrow H_2O_2$ экспериментально не подтверждено [43].

Концентрация H_2 в воздухе (включая следовые количества $CH_4 \approx 2 \cdot 10^{-40}\%$) на порядки ниже, чем O_2 , что предопределяет доминирование озона в продуктах разряда. Поэтому выход H_2O_2 в коронном разряде пренебрежимо мал по сравнению с O_3 , что исключает необходимость детального анализа его кинетики в данном исследовании.

Технологические аспекты диффузионного насыщения поверхности представлены на рисунке 2.4.1. Модель локального покрытия, показывает где

положительная корона усиливает хемосорбционную активность воздуха, вызывает селективное окисление поверхности и блокирует процессы азотирования.

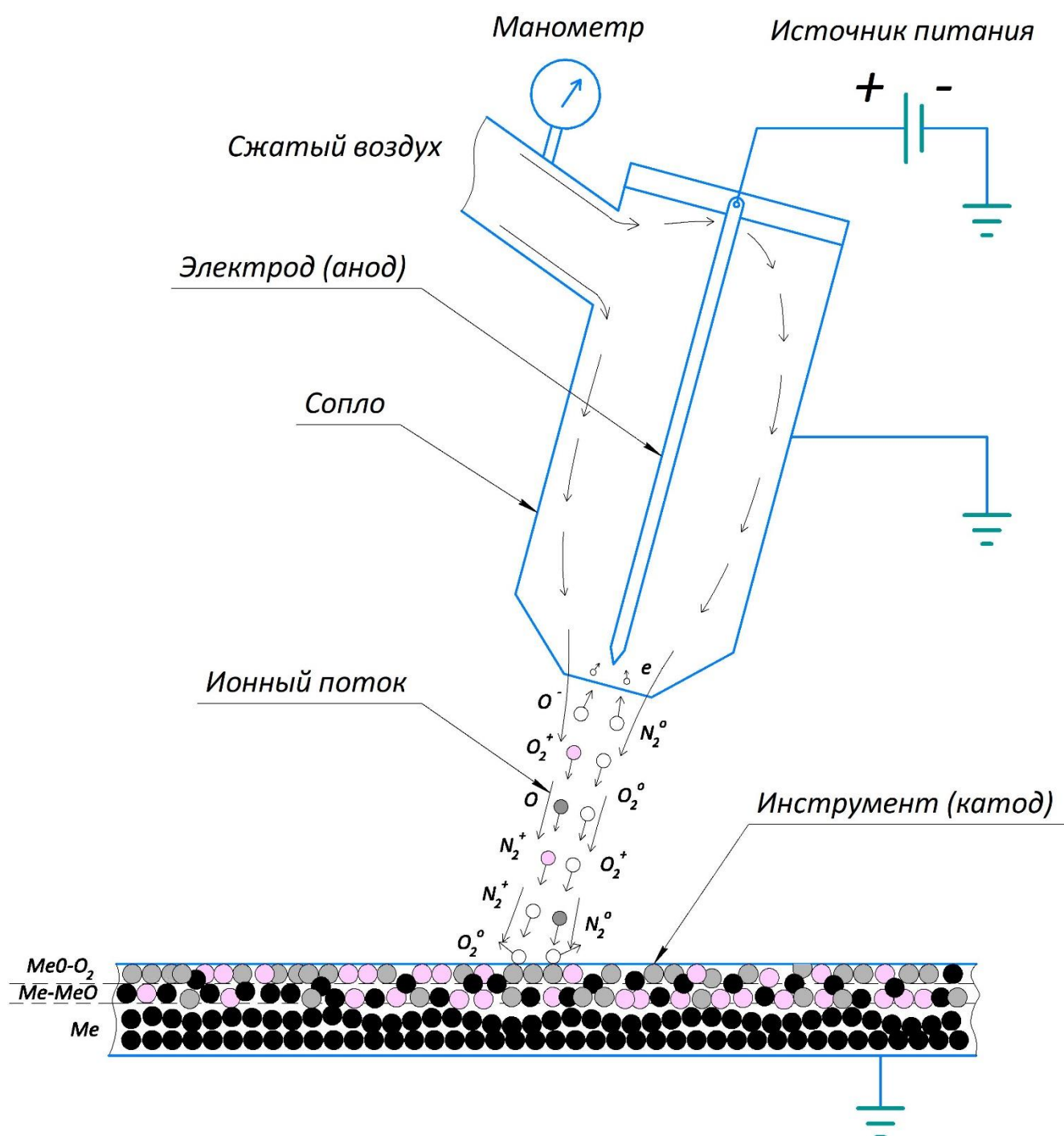


Рисунок 2.4.1 – Физико-химическая модель технологии нанесения локального покрытия

2.5 Влияние дискретных диффузионных покрытий на работоспособность инструмента

Применение диффузионных покрытий является эффективным методом модификации поверхностного слоя режущего инструмента. Данная технология позволяет не только значительно повысить его износостойкость, но и увеличить общую конструктивную прочность за счет улучшения прочностных характеристик материала в поверхностной зоне [45, 83]. Особенностью локальных (ячеистых) диффузионных покрытий, в отличие от сплошных, является их дискретная структура. Эта структура способствует релаксации остаточных напряжений, возникающих в поверхностном слое в процессе эксплуатации, что является ключевым фактором повышения долговечности.

Механизм повышения сопротивления усталостному разрушению (трещиностойкости) для покрытий с ячеистой структурой можно объяснить двумя основными факторами:

- 1) распределенные границы между модифицированными и неизмененными зонами поверхности выступают в качестве эффективных барьеров, останавливающих или тормозящих развитие усталостных и термоусталостных трещин;
- 2) формируется упорядоченная система чередующихся зон с различным уровнем и знаком внутренних напряжений, что способствует их взаимной компенсации и созданию более благоприятного напряженно-деформированного состояния.

Существенным технологическим преимуществом рассматриваемого подхода является возможность целенаправленного проектирования эксплуатационных характеристик инструмента. Это достигается путем регулирования геометрических параметров ячеистой структуры (например, размера, формы и шага ячеек) на этапе технологической подготовки нанесения покрытия. Таким образом, создается управляемая регулярная неоднородность, что является принципиальным отличием от негативного влияния случайных технологических неоднородностей рельефа

режущей кромки, изучавшихся, например, в контексте фрикционного изнашивания в работах Бразова А.А. [9] (рисунок 2.5.1).

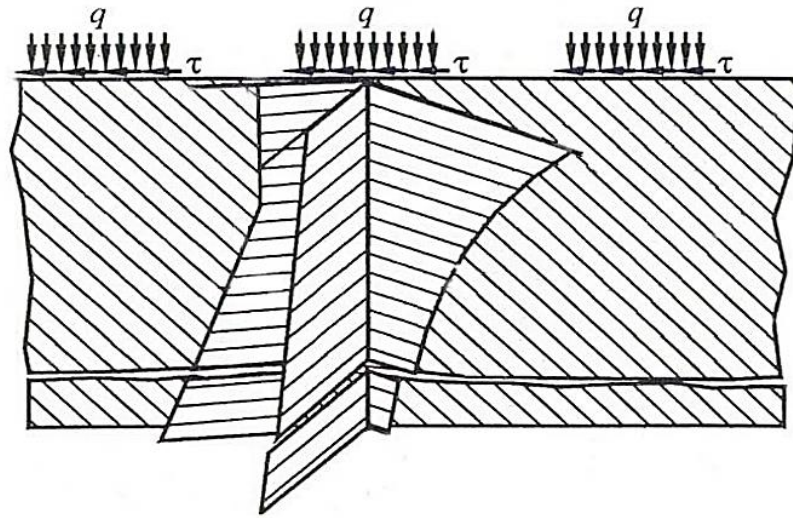


Рисунок 2.5.1 – Расчетная схема износа контактной поверхности с учетом исходной поврежденности материалов

Следовательно, предложенная методика обеспечивает управляемое изменение соотношения между высоконапряженными и релаксированными зонами на контактной поверхности. Это позволяет формировать оптимальное распределение механических напряжений по длине режущей кромки и, как следствие, минимизировать дестабилизирующее влияние неизбежных случайных технологических дефектов.

Дискретные покрытия формируются в виде регулярной пространственной структуры, состоящей из периодически расположенных модифицированных зон, разделённых участками неизменённого материала основы. Концептуальной основой данного подхода является управление процессами деградации материала путём создания искусственных границ раздела. Эти границы, возникающие на контакте областей с различными механическими свойствами (прежде всего, модулем упругости), функционируют как эффективные барьеры, тормозящие или полностью блокирующие распространение усталостных трещин и других видов повреждений. Показателем эффективности такой структуры может служить

интегральное снижение модуля упругости композитного поверхностного слоя, коррелирующее с его сопротивлением зарождению и развитию трещин.

Ключевые эксплуатационные преимущества ячеистой архитектуры покрытий заключаются в следующем:

1) Повышение трещиностойкости. Деформационные повреждения концентрируются в пределах отдельных структурных элементов (ячеек), что предотвращает их неконтролируемое распространение по всей поверхности инструмента.

2) Прогрессирующий характер разрушения. Благодаря независимому деформационному поведению изолированных зон, частичное повреждение покрытия не приводит к немедленному катастрофическому отказу, обеспечивая сохранение функциональности инструмента на остальной площади контакта.

Для анализа и прогнозирования поведения таких систем применяется методология гомогенизации свойств, схематично представленная на рисунке 2.5.1. Её суть заключается в определении эффективных макроскопических характеристик материала покрытия через механический отклик его минимального повторяющегося элемента — единичной ячейки. Данный подход позволяет существенно снизить сложность расчётной модели при сохранении адекватности физического описания, а также проводить оценку эксплуатационной долговечности покрытия в зависимости от заданных геометрических параметров структуры и режимов нагружения. Сопоставление сплошного и локального покрытий с точки зрения действующих на них растягивающих напряжений при одинаковом значении эффективного напряжения $\sigma_{\text{Э}}$ (при одинаковой величине сторонней растягивающей силы P , поскольку $\sigma_{\text{Э}} = \frac{p}{S} = \frac{P}{n_2 S} = \frac{P}{n_2 l * h_{\text{И}}} = \frac{P}{H_{\text{И}} h_{\text{И}}}$) приводит к ситуации противоположной той, которая имела место сопоставления при одинаковой величине $\Delta l/l$: при $x_1 \neq 1$, $x_2 \neq 0$ и $A \neq 0$ растягивающие напряжения для локального покрытия превышают растягивающие напряжения для сплошного покрытия.

Формирование защитных покрытий неизбежно сопровождается возникновением значительных остаточных напряжений, величина которых

увеличивается пропорционально толщине покрытия и существенно снижает его прочностные характеристики [32]. Именно эти напряжения становятся основной причиной разрушения большинства покрытий в процессе эксплуатации.

Современные технологические приемы позволяют эффективно управлять уровнем остаточных напряжений в покрытиях. Одним из перспективных подходов является снижение модуля упругости покрытия путем введения пластифицирующих добавок. Этот прием обеспечивает релаксацию напряжений за счет способности таких добавок к пластической деформации [32].

Особое значение в этом контексте имеет структура покрытия. Наиболее эффективными являются структуры, содержащие мягкие слои. Такие кристаллические структуры характеризуются:

1. более низкими значениями модуля упругости;
2. сниженным модулем сдвига;
3. повышенной способностью к релаксации напряжений.

Ярким примером таких структур являются локальные диффузионные покрытия, где роль мягких включений играют участки основного материала, не подвергшиеся покрытию. Такая архитектура обеспечивает:

1. Снижение концентрации остаточных напряжений.
2. Повышение трещиностойкости.
3. Улучшение адаптации к деформационным нагрузкам.

Важно отметить, что именно чередование зон с различными механическими свойствами создает оптимальные условия для перераспределения и релаксации возникающих напряжений.

2.6 Обоснование технологии комплексного модифицирования поверхности лазерной абляцией и плазмой коронного разряда

Актуальность исследования обусловлена необходимостью решения фундаментальной проблемы – противоречия между требованиями к высокой

поверхностной твердости инструмента и сохранением пластичности основного материала. Традиционные методы упрочнения демонстрируют ограниченную эффективность при эксплуатации в условиях:

1. Циклических термомеханических нагрузок.
2. Адгезионно-абразивного износа.
3. Термоусталостного растрескивания.

Научная гипотеза заключается в комбинации лазерной абляции и дискретных покрытий, что позволит реализовать синергетический эффект за счет формирования адаптивной микроструктуры, снижающей концентрацию напряжений, создания зон с градиентными свойствами «основа-покрытие» и локального изменения фазового состава поверхностного слоя.

Ожидаемыми ключевыми результатами исследования является:

1. снижение коэффициента трения до показателей 0,15-0,25 μ ;
2. уменьшение износа;
3. увеличение рабочих температур.

Современные требования к режущим инструментам диктуют необходимость сочетания высокой износостойкости с сохранением пластичности основы инструмента. Решить эту задачу можно комбинированным методом, включающим предварительную лазерную абляцию поверхности с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия. Такой подход позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики инструмента за счет синергетического эффекта взаимодействия двух методов обработки.

Лазерная абляция создает на поверхности инструмента определенную микротекстуру с заданными параметрами шероховатости (рисунок 2.6.1), что способствует увеличению площади контакта и улучшению адгезионных свойств покрытия. Из рисунка 2.6.1 можно выделить две зоны:

- 1) Оксидный слой пористый, с трещинами и неравномерным распределением фаз.
- 2) Микроструктурированный основной материал.

Локальный лазерный нагрев привел к реакциям с кислородом воздуха и образованию оксидов, но из-за высокой скорости охлаждения они имеют дефекты. Неоднородность структуры указывает на термические напряжения, которые могут вызвать микротрещины.

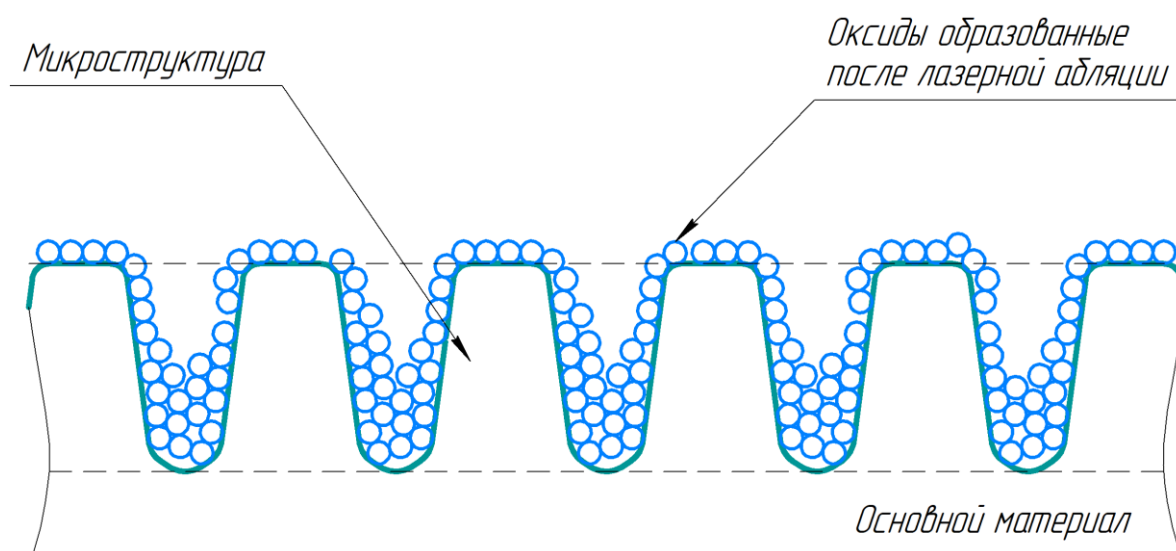


Рисунок 2.6.1 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции

Экспериментальные данные показывают, что предварительная лазерная обработка позволяет повысить адгезию покрытия на 30-45%. Важным аспектом является формирование сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое, что снижает риск хрупкого разрушения инструмента в процессе эксплуатации. Кроме того, лазерная обработка активирует поверхность за счет очистки и создания дефектов в кристаллической решетке, что ускоряет последующую диффузию элементов покрытия. Стоит отметить, что без последующего диффузионного покрытия оксидный слой уязвим к эрозии и термической усталости.

Процессы лазерной абляции позволяют получить микроструктуру которая улучшает адгезию диффузионного покрытия. Микро- и нанорельеф служит «якорем» для оксидов (рисунок 2.6.2).

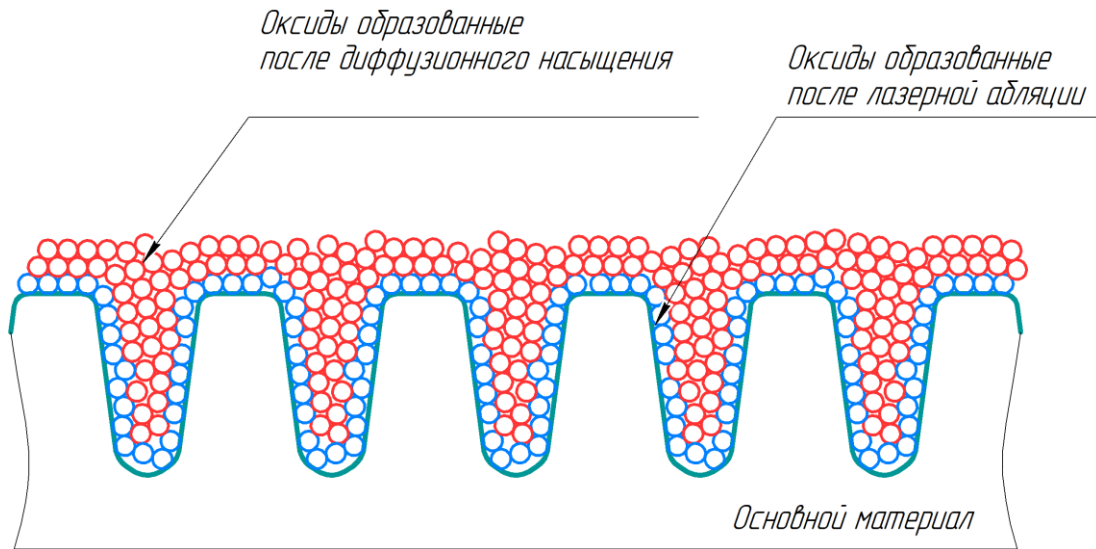


Рисунок 2.6.2 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции, с последующим образованием оксидов после диффузионного насыщения

Из рисунка 2.6.2 просматриваются три различные зоны:

1. Оксиды после диффузионного насыщения – верхний слой с однородной мелкозернистой структурой.
2. Оксиды после лазерной абляции – промежуточный слой с неоднородными включениями.
3. Основной материал – неизменная подложка.

Высокая температура во время лазерной абляции приводит к термодинамическим эффектам, что активизирует поверхность, ускоряя последующее диффузионное насыщение.

Переход от оксидов дискретного диффузионного покрытия к оксидам на поверхности после лазерной абляции обеспечивает плавное изменение коэффициента термического расширения, снижая напряжение.

Комбинация лазерной абляции и дискретного диффузионного покрытия образует более стабильную и износостойкую структуру за счет синергии методов.

Особое значение имеет промежуточный слой, образующийся при лазерной абляции (рисунок 2.6.3). Этот слой выполняет несколько важных функций: обеспечивает плавный переход механических свойств от основы к покрытию,

снижает градиент термических напряжений и способствует более равномерному распределению эксплуатационных нагрузок. Толщина промежуточного слоя обычно составляет 5-15 мкм, а его структура характеризуется повышенной плотностью дислокаций и наличием нанокристаллических фаз.

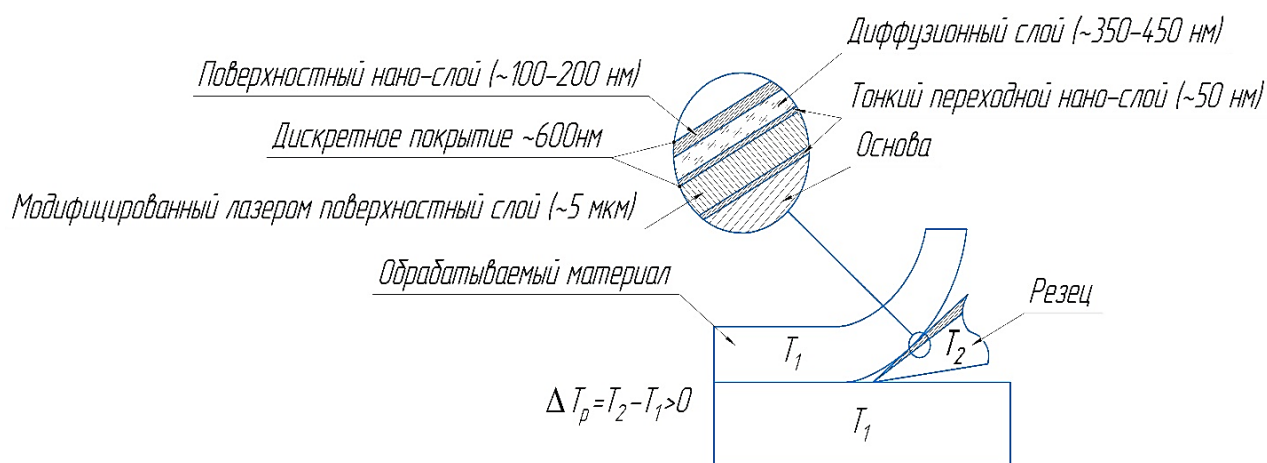


Рисунок 2.6.3 – Структура комбинированного покрытия

Дискретное диффузионное покрытие, нанесенное на подготовленную лазером поверхность, имеет ряд преимуществ перед сплошными покрытиями. Чередование зон с покрытием и без покрытия позволяет существенно снизить уровень остаточных напряжений, возникающих в процессе нанесения. Мягкие включения (зоны без покрытия) эффективно компенсируют разницу коэффициентов термического расширения покрытия и основы, что особенно важно при работе инструмента в условиях переменных термических нагрузок. Экспериментально установлено, что локальные деформации в такой системе не приводят к катастрофическому разрушению всего покрытия.

Структура дискретного покрытия, нанесенного на модифицированную лазерной абляцией поверхность, имеет четко выраженную слоистую организацию. Верхний нанослой толщиной 200-500 нм обеспечивает высокую износостойкость и стойкость к усталостному разрушению. Диффузионный слой толщиной 1-3 мкм отвечает за повышение жесткости инструмента при сохранении необходимого запаса пластичности. Особое значение имеет тонкий переходный слой (50-100 нм),

который обеспечивает химическую совместимость покрытия с основой инструмента.

Технология нанесения покрытия с использованием активированного воздушного потока ($p = 101325 \text{ Па}$, $T = 288,15 \text{ К}$) позволяет получать покрытия с преобладанием нитридных и карбидных фаз. Ионизация в коронном разряде генерирует реакционноспособные частицы (N^+ , O^-), которые взаимодействуют с материалом инструмента, образуя упрочняющие соединения. Состав и свойства покрытия могут меняться в зависимости от химического состава инструментальной стали [84].

Оптимизация параметров обработки является ключевым фактором успешного применения комбинированного метода. Для лазерной абляции оптимальная мощность к скорости сплошной обработки. Плотность дискретных ячеек покрытия рекомендуется поддерживать на уровне 60-70%, что обеспечивает оптимальный баланс прочностных и пластичных характеристик.

Использование комбинированного метода обработки позволяет увеличить срок службы режущего инструмента в 2-3 раза по сравнению с традиционными методами упрочнения. Значительное снижение термоусталостных повреждений достигается за счет эффективной релаксации напряжений в системе «основа - промежуточный слой - покрытие». При этом сохраняется требуемая пластичность основы инструмента, что особенно важно при работе с ударными нагрузками.

Перспективным направлением дальнейших исследований является разработка гибридных установок, объединяющих процессы лазерной абляции и нанесения покрытий в едином технологическом цикле. Особый интерес представляет использование методов искусственного интеллекта для оптимизации параметров обработки для конкретных пар «инструмент - заготовка». Дальнейшее изучение свойств промежуточного слоя, сформированного лазерной абляцией, позволит более точно прогнозировать эксплуатационные характеристики инструмента.

Выводы по главе

Теоретически обосновано применение комбинированного метода модификации поверхности режущего инструмента, включающего лазерную абляцию и нанесение дискретных диффузионных покрытий. Установлено, что такой подход обеспечивает синергетический эффект, сочетая высокую поверхностную твердость с сохранением пластичности основного материала, что повышает износостойкость и стойкость инструмента.

Лазерная абляция позволяет формировать заданную микроструктуру поверхности с контролируемой шероховатостью и сжимающими остаточными напряжениями, улучшая адгезию последующих покрытий и снижая риск хрупкого разрушения. Ключевыми факторами являются оптические, теплофизические свойства материала, а также параметры лазерного излучения (мощность, длина волны, длительность импульса) и технологические условия обработки.

Дискретные диффузионные покрытия обеспечивают локальное упрочнение поверхности, снижение эффективного модуля упругости и повышение трещиностойкости за счет ячеистой структуры, которая эффективно перераспределяет и релаксирует напряжения. Это особенно важно при высоких термомеханических нагрузках.

Выявлены физико-химические закономерности формирования дискретных покрытий методом диффузионного насыщения с использованием коронного разряда. Процесс характеризуется высокой скоростью насыщения, экологической безопасностью и образованием упрочняющих нитридных, оксидных и карбидных фаз, что повышает эксплуатационные характеристики инструмента.

Установлено, что предварительная лазерная обработка увеличивает адгезию покрытия на 30–45% за счет активации поверхности и формирования переходного слоя с повышенной плотностью дислокаций и нанокристаллическими фазами. Промежуточный слой (5–15 мкм) обеспечивает плавный переход механических свойств, снижая термические напряжения.

Определены оптимальные параметры обработки: плотность дискретных ячеек покрытия на уровне 60–70% и соотношение мощности лазера к скорости обработки. Это обеспечивает баланс между прочностью и пластичностью, увеличивая срок службы инструмента в 2–3 раза по сравнению с традиционными методами.

Разработана схема взаимосвязей параметров лазерной абляции, включающая плотность мощности как ключевой фактор управления процессом. Численное моделирование и статистические методы подтвердили возможность прогнозирования качества поверхности с ошибкой 10–15%.

Предложены перспективные направления исследований, включая разработку гибридных установок для интеграции лазерной абляции и нанесения покрытий, а также использование методов численного моделирования, нейронных сетей для оптимизации параметров обработки под конкретные пары «инструмент–заготовка».

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Современные тенденции развития машиностроения предъявляют повышенные требования к износостойкости и стойкости режущего инструмента, особенно при обработке труднообрабатываемых материалов. В этом контексте особый интерес представляют такие методы модификации поверхности, как лазерная абляция и дискретно-диффузионное нанесение покрытий, а также их комбинированное применение. Теоретическое обоснование и оптимизация этих технологических процессов требуют детального математического моделирования для установления взаимосвязи между параметрами обработки и эксплуатационными характеристиками инструмента.

Моделирование процессов лазерной абляции является сложной многопараметрической задачей, включающей анализ теплопереноса, фазовых превращений и формирования остаточных напряжений в поверхностном слое инструмента. Особое значение имеет прогнозирование структуры и свойств модифицированного слоя, образующегося в результате воздействия лазерного излучения. Ключевыми параметрами являются мощность излучения, скорость сканирования и геометрические характеристики формируемой структуры.

Дискретно-диффузионная модификация поверхности инструмента требует отдельного рассмотрения процессов массопереноса, формирования градиентных структур и кинетики роста покрытия. Важным аспектом является моделирование механического поведения ячеистых структур при эксплуатационных нагрузках, включая анализ распределения напряжений и условий зарождения трещин.

Особую сложность представляет моделирование комбинированного воздействия, когда лазерная абляция предшествует нанесению дискретного покрытия. В этом случае необходимо учитывать взаимное влияние предварительно созданной структуры на процессы адгезии и формирования покрытия, а также синергетический эффект совмещения двух методов обработки.

Целью данной главы является разработка комплексной математической модели, описывающей:

1. термические и структурные превращения при лазерной абляции;
2. кинетику формирования дискретного диффузионного покрытия;
3. взаимодействие модифицированных слоев при комбинированной обработке.

Результаты моделирования позволят установить оптимальные параметры обработки для различных типов инструментальных материалов и условий эксплуатации, что является важным этапом в создании перспективных технологий упрочнения режущего инструмента.

3.1 Разработка моделей, описывающих влияние задающих параметров технологического процесса лазерного модифицирования на показатели эффективности и качества обработки

Технологические процессы лазерной обработки основаны, прежде всего на механизме локального нагрева материала посредством поглощения электромагнитной волны в веществе. Данный механизм адекватно описывается тепловой моделью и весь процесс лазерного воздействия может быть разделен на несколько стадий: 1) поглощение излучения и передача энергии решетке; 2) нагрев материала без фазовых превращений; 3) изменение агрегатного состояния (плавление, сублимация, термодеструкция); 4) разрушение материала и удаление вещества с поверхности; 5) термодинамические превращения, приводящие к образованию новых соединений; 6) релаксация термических напряжений в процессе остывания.

Для решения задачи обнажения зернистой структуры и формирования заданных микро- и наноструктур, необходимо минимизировать энергозатраты на нагрев поверхности до температуры кипения (испарения) $T_{исп}$. Исследуемая система является управляемой, поскольку изменение микро- и макроскопических

свойств обрабатываемого материал осуществляется за счет варьирования параметров лазерного излучения.

Учитывая, что температура поверхности T является функцией поглощенной единицей площади мощности, из уравнения теплопроводности можно вывести зависимость между температурой поверхности и плотностью мощности излучения [14].

Формулы 3.1.1 и 3.1.2 позволяют рассчитать пороговую плотность мощности $E_f^{\text{пор}}$, необходимую для достижения заданной критической температуры поверхности до заданной критической температуры $T_{кр}$ в импульсном и непрерывных режимах генерации излучения [14]:

$$E_{f\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T-T_n)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}} \quad (3.1.1)$$

$$E_{f\text{непр}}^{\text{пор}} = \frac{(T-T_n)k}{(1-R)r_0} \quad (3.1.2)$$

где, T – заданная температура поверхности, K ; T_n – начальная температура; k – теплопроводность, $Вт/м \cdot K$; $a=e=1-R$ – поглощательная (при $\lambda=1,06$ $\mu\text{м}$); A – температуропроводность, $м^2/с$; τ – длительность импульса, $с$.

Подставим в формулы 3.1.1 и 3.1.2 теплофизические и оптические параметры химических элементов режущего инструмента, указанные в таблице 3.1.1, и вычислим значения $E_f^{\text{пор}}$ при применении технологического лазера с длиной волны $\lambda=1,06$ $\mu\text{м}$.

Таблица 3.1.1 – Теплофизические и оптические параметры некоторых материалов режущего инструмента

Элемент	Критическая температура $T_{\text{исп}}, K$	Теплопроводность $k, Вт/м \cdot K$	Поглощательная способность a (при $\lambda=1,06$ $\mu\text{м}$)	Температуропроводность $A, м^2/с$
Fe	3134	80,4	0,35	$2,3 \cdot 10^5$
W	5828	162,8	0,41	$3,17 \cdot 10^5$
Ti	3560	21,9	0,42	$0,65 \cdot 10^5$

Исходя из формулы (3.1.3), может быть определена требуемая мощность лазерного излучения для разрушения вещества в фокальной плоскости излучения на единице площади обрабатываемой поверхности.

$$P = E_f^{\text{пор}} \times S \quad (3.1.3)$$

где S – площадь лазерного пятна, м^2

Расчетные данные приведены в таблицах 3.1.2 и 3.1.3. Из расчетных значений видно, что использование излучения с длительностью импульса 10^{-9} с, является энергетически выгодным, так необходимая мощность лазерной установки для обработки железа $\approx 0,4 \text{ Вт}$; вольфрама $\approx 0,5 \text{ Вт}$; титана $\approx 0,2 \text{ Вт}$.

Таблица 3.1.2 – Расчетные значения энергетических параметров лазерного излучения в нормальных условия $T_n = 293 \text{ К}$, в непрерывном режиме и радиусе лазерного пятна $r_0 = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

Материал	Пороговая плотность мощности $E_f^{\text{пор}}, \text{Вт/м}^2$	Мощность лазерной установки Р, Вт
Fe	$3,7 \times 10^{10}$	35,52
W	$1,12 \times 10^{11}$	117,12
Ti	$9,7 \times 10^9$	9,312

Таблица 3.1.3 – Расчетные значения энергетических параметров лазерного излучения в нормальных условия $T_n = 293 \text{ К}$, при длительности импульса $\tau_1 = 10^{-9}$ с и радиусе лазерного пятна $r_0 = 1,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}$

Материал	Пороговая плотность мощности $E_f^{\text{пор}}, \text{Вт/м}^2$	Мощность лазерной установки Р, Вт
Fe	$38,1 \times 10^7$	0,365
W	54×10^7	0,518
Ti	$18,7 \times 10^7$	0,179

Полученные значения мощности являются критерием для выбора необходимой мощности технологической лазерной установки, достаточной для разрушения основных компонентов инструментального материала. Однако,

конечный результат обработки также зависит от структуры материала, типа операции и степени пространственной локализации излучения. Анализ полученных выражений показывает, что время воздействия влияет преимущественно на величину пороговой мощности лазера, а не на тип технологической операции и объем обработанного материала.

3.2 Термодинамические превращения в поверхностном слое инструментальной стали при лазерной абляции на воздухе

При повышении температуры поверхности в следствии лазерной абляции в технологической среде (воздух, вода) возможно протекание ряда побочных физико-химических процессов, термодинамическая вероятность которых варьируется с различной степенью. В поверхностном слое протекают взаимоисключающие процессы, как упрочняющие, так и разупрочняющие. Корректный подбор температурного режима, а следовательно, и параметров лазерного излучения, на основе теоретического анализа позволяет оптимизировать процесс формирования новых функциональных свойств поверхности режущего инструмента.

При нагреве поверхностного слоя сплавов железа с углеродом в интервале от 300 K и до 1000 K могут происходить следующие термохимические реакции:

- 1) взаимодействие атомов железа с кислородом и образованием ряда оксидов и карбида железа;
- 2) взаимодействие карбида железа с кислородом, приводящее к образованию оксидов металла и оксидов углерода.

Как следствие, первый тип реакций приводит к упрочнению поверхностного слоя, а второй тип ведет преимущественно к снижению твердости и прочности.

Из первого и второго закона термодинамики были определены величины энтальпии, энтропии и энергии Гиббса для всех вероятных термохимических реакций.

Изменение энтальпии, то есть теплового эффекта, процессов связано с молярной теплоемкостью веществ довольно соотношением 3.2.1:

$$H_2 - H_1 = C_p \cdot (T_2 - T_1), \quad (3.2.1)$$

где H – энтальпия, Дж/моль ; C – теплоемкость, $\text{Дж/моль} \cdot \text{K}$; T – температура, K .

Изменение энергии Гиббса, которое характеризует вероятность направления той или иной химической реакции, рассчитывается по формуле 3.2.2:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S, \quad (3.2.2)$$

где G – энергия Гиббса, Дж/моль ; S – энтропия, $\text{Дж/моль} \cdot \text{K}$.

Константа равновесия химического процесса связана с изменением энергии Гиббса по формуле 3.2.3:

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K^{\text{рав}}, \quad (3.2.3)$$

где R – универсальная газовая постоянная, $8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$.

Термодинамические данные по каждому из веществ при различных температурах, можно рассчитать, исходя из значений об энтальпии, энтропии и теплоемкости при стандартной температуре, которая составляет $298,15 \text{ K}$. Термодинамические величины исследуемых веществ приведены в справочнике [57].

Изменение термодинамических величин энтальпии, энтропии и энергии Гиббса в результате всех термохимических реакций в диапазоне температур от 400 до 1000 K , возможных для исследуемого процесса, рассчитаны нами по формулам первого и второго закона термодинамики. Расчетные данные приведены в таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1 – Изменение энтальпии, энтропии и энергии Гиббса химических реакций, протекающих в инструментальных сталях при температурах $400 \dots 1000 \text{ K}$

№	Реакция	ΔH , кДж	ΔS , $\text{Дж/моль} \cdot \text{K}$	ΔG , кДж
1	$2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$	-528 ... -511	-137	-473...-373
2	$2\text{Fe} + 1,5\text{O}_2 = \text{Fe}_2\text{O}_3$	-821 ... -812	-274	-711...-538
3	$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	-1119...-1107	-345	-981...-762

№	Реакция	ΔH , кДж	ΔS , Дж/моль·К	ΔG , кДж
4	$3\text{Fe} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C}$	27 ... 48	21	19...27
5	$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}\uparrow$	375 ... 370	158	312...158
6	$3\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C} + 1,5\text{O}_2\uparrow$	820 ... 824	226	730...598
7	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} = 2\text{Fe} + \text{CO}\uparrow + \text{O}_2\uparrow$	932 ... 926	364	786...562
8	$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} = 2\text{Fe}_3\text{C} + 4,5\text{O}_2\uparrow$	2518 ... 2539	676	2248...1863
9	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 3\text{Fe} + \text{CO}\uparrow + 1,5\text{O}_2\uparrow$	1220 ... 1253	339	1084...914
10	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C} + 2\text{O}_2\uparrow$	1143 ... 1170	366	997...804
11	$\text{Fe}_3\text{C} + 2,5\text{O}_2\uparrow = 3\text{FeO} + \text{CO}_2\uparrow$	-427 ... -411	-223	-338...-188
12	$\text{Fe}_3\text{C} + 2\text{O}_2\uparrow = 3\text{FeO} + \text{CO}\uparrow$	-424 ... -412	-137	-369...-275
13	$2\text{Fe}_3\text{C} + 6,5\text{O}_2\uparrow = 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2\uparrow$	-1564...-1537	-864	-1218...-673
14	$2\text{Fe}_3\text{C} + 5,5\text{O}_2\uparrow = 3\text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}\uparrow$	-2134...-2087	-687	-1859...-1400
15	$\text{Fe}_3\text{C} + 3\text{O}_2\uparrow = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2\uparrow$	-738...- 704	-363	-593 ... -341
16	$\text{Fe}_3\text{C} + 2,5\text{O}_2\uparrow = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}\uparrow$	-748...-727	-276	-638 ... -451

Анализ расчетных данных, представленный в таблице 3.2.1, можно заключить, что энтропийный фактор положителен для процессов 4–10. Для реакций 1–3 и 11–16 анализ значений свидетельствует о том, что их равновесие смещено в правую сторону, поскольку энтальпийный фактор преобладает над энтропийным.

Наиболее близкой к состоянию термодинамического равновесия является реакция (4), так как она обладает положительным энтропийным эффектом и значение энергии Гиббса близко к нулю. Следовательно, под воздействием лазерного излучения, на поверхности инструментальной стали формируется система Fe/Fe₃C, причем равновесие в данной системе смещается вправо, что упрочняет поверхностный слой вследствие образования более твердого карбида и изменяет свойства поверхности.

3.3 Теплопередача при взаимодействии лазерного излучения с инструментальными материалами

Для удобства математического моделирования процессов теплопереноса в данной работе рассматривается взаимодействие лазерного излучения с непрозрачными материалами. Данное допущение позволяет пренебречь эффектами объемного поглощения энергии и сфокусироваться на анализе поверхностных тепловых явлениях [29]. Такое предположение справедливо при обработке инструментальных материалов и их сплавов в инфракрасном диапазоне, поскольку коэффициент поглощения данного исследуемого материала превышает 60–80% (рисунок 2.2.1).

Используется модель сфокусированного когерентного источника, пространственное распределение плотности теплового потока которого в фокальной плоскости описывается следующим выражением:

$$q(r) = q_0 \left[\frac{2I_1}{(Br)^2} \right] \quad (3.3.1)$$

где $I_1(Br)$ – функция Бесселя 1 рода 1 порядка от аргумента Br ;

$$B = I_1 D / \lambda F . \quad (3.3.2)$$

где D – диаметр линзы; λ – длина волны (излучения); F – фокусное расстояние; q_0 – интенсивность в центре пятна, рассчитываемая по формуле

$$q_0 = \frac{I_1 D^2}{4\lambda^2 F^2} = P_0, \quad (3.3.3)$$

где P_0 – мощность излучения, поглощенная материалом.

Плотность теплового потока на поверхности может быть представлена в виде произведения функции, зависящей только от времени, и функции, зависящей от координат поверхности:

$$q_n(r\tau) = A\varphi(\tau)q(r) \quad (3.3.4)$$

где A – поглощающая способность обрабатываемого материала, зависящая от степени ее обработки, (шероховатости), так и от ее температуры; $q(r)$ – пространственное распределение плотности мощности излучения, рассчитываемое

по формуле (3.3.1) с учетом (3.3.2) и (3.3.3); $\varphi(\tau)$ – функция, описывающая временную структуру импульса.

Например, для импульса лазера, работающего в режиме модуляции добротности с упорядоченной генерацией, функция может быть представлена выражением:

$$\varphi(\tau) = (1 - \cos(\omega\tau)). \quad (3.3.5)$$

Для огибающей группы пиков (пиковой генерации) справедливо следующее выражение:

$$\varphi(\tau) = \tau^n \exp(br^m), \quad (3.3.6)$$

где n и m – некоторые числа (целые или дробные); b – коэффициент затухания.

Модуляция добротности лазера позволяет генерировать одиночные импульсы излучения с длительностью порядка 10^{-8} с. Временная форма подобных импульсов может быть аппроксимирована функцией, близкой к треугольной, при этом крутизна нарастающего (переднего) фронта может значительно отличаться от крутизны спадающего (заднего) фронта.

При взаимодействии такого лазерного импульса с поверхностью материала часть излучения отражается, а оставшаяся часть проникает вглубь объема и поглощается. В результате в приповерхностном слое формируется пространственно-временной источник тепла, распределённый как по глубине, так и во времени.

Для большинства технологических применений, где глубина проникновения излучения сопоставима или меньше характерного размера облучаемой зоны, пространственное распределение плотности поглощённой энергии в объёме материала описывается законом Бугера–Ламберта:

$$q_v(z) = q_{v0}(1 - R)e^{-az}, \quad (3.3.7)$$

где $q_v(z)$, q_{v0} – соответственно объемные плотности теплового потока излучения на расстоянии z и на поверхности, Вт/см³:

$$q_{v0} = \frac{q_n(r, \tau)}{0,1\delta}. \quad (3.3.8)$$

Здесь $\delta \approx 10^{-4} \dots 10^{-5}$ м – глубина скин-слоя, в котором световой поток излучения поглощается при взаимодействии с электронами проводимости; R и α – коэффициент отражения и коэффициент поглощения.

С учетом совместного действия объемного источника тепла, плотность которого рассчитывают по выражению (3.3.7) на основе (3.3.8), и поверхностного источника тепла с плотностью теплового потока по выражению (3.3.4) с учетом (3.3.5), (3.3.6) решают уравнения теплопроводности.

Таким образом баланс тепла в элементарном объеме представлен в выражении:

$$\begin{aligned} & C[T]\gamma[T] \frac{dT(x,y,z,t)}{dt} + C[T]\gamma[T] \frac{dT(x,y,z,t)}{dy} V_n + C[T]\gamma[T]\tau_p \frac{d^2T(x,y,z,t)}{dt^2} = \\ & = \nabla\lambda[T]\nabla T(x,y,z,t) + C[T]\lambda[T]V_{TM} \frac{dT(x,y,z,t)}{dx} - AL_{пл}\gamma[T] \frac{dV_{пл}}{dt} + \\ & + B \frac{q_n(r,\tau)}{0.1\delta} \pm D \frac{dW(x,y,z,t)}{dt} \pm m_a C_a[T_a] \frac{dn_a}{dt} (T_a - T(x,y,z,t)) \pm \\ & \pm P_{T.X.P}(n_A, n_B, T, t_e) \frac{dn_{A(B)}}{dt} L_{T.X.P} + q_v(z), \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

где $C[T]$ и $\gamma[T]$ – теплоемкость и плотность обрабатываемого материала, соответствующие температуре T ; τ_p – время релаксации температуры на один кельвин; $V_{пл}$ – скорость перемещения плазменного потока лазерного излучения; $L_{пл}$ и $L_{T.X.P}$ – удельные теплота плавления и термохимической реакции; V_{TM} – скорость перемещения фронта испарения; $V_{пл}$ – объем расплавленного металла; $W(x, y, z, t)$ – энергия деформации единицы объема обрабатываемого материала; m_a – масса диффундирующего атома; $C_a[T_a]$ – теплоемкость диффундирующего материала при температуре T_a ; $P_{T.X.P}(n_A, n_B, T, t_e)$ – вероятность термохимической реакции, зависящая от концентрации реагентов n_A и n_B , температуры T и времени взаимодействия t_e ; n_A и n_B – концентрация реагентов, определяющих возможность реакции.

Тепловой баланс при лазерной обработке описывается следующими процессами:

1) Изменение теплосодержания (левая часть уравнения): локальный нагрев за счет движения лазерного луча или обрабатываемой поверхности (характеризуется скоростью $V_{пл}$).

2) Теплофизические процессы (правая часть уравнения): теплоперенос с конечной скоростью, теплопроводность, а также фазовые переходы (испарение, плавление).

3) Превращения энергии: поглощение лазерной энергии, термомеханические эффекты (деформация материала), диффузионный перенос тепла и термохимические реакции (между материалом и покрытием, между компонентами сплава).

Далее рассмотрим подробнее методику расчета каждого слагаемого, входящего в выражение (3.3.9).

Используя дискретные значения теплоемкости при различных температурах, ее зависимость теплоемкости от температуры можно выразить эмпирической формулой:

$$C[T] = (a + b(T - 273) + c(T - 273)^2) * 4186,8, \quad (3.3.10)$$

где a , b , c – коэффициенты, значения которых приведены в [21] для различных материалов.

Зависимость плотности материала от температуры также может быть описана эмпирической формулой:

$$\gamma[T] = d - e(T - 273), \quad (3.3.11)$$

где d , e – коэффициенты, выбираемые в зависимости от материала [59].

В случае, когда лазерного излучения стационарно относительно обрабатываемой поверхности, второе слагаемое в левой части формулы (3.3.9) обращается в нуль. Если же имеется перемещение потока параллельно обрабатываемой поверхности, то $V_{пл}$ представляет собой скорость сканирования по координате y .

Третье слагаемое в левой части учитывает конечную скорость распространения тепла (волновой характер теплопереноса). Время релаксации тепловых колебаний τ_p может быть вычислено по формуле, приведенной в [31].

Первое слагаемое в правой части описывает изменение количества тепла за счет теплопроводности. Зависимость коэффициента теплопроводности λ от температуры в каждый момент времени задается эмпирическими зависимостями [59].

Во втором слагаемом правой части формулы (3.3.9), учитывающем смещение фронта испарения, скорость испарения материала $V_{\text{исп}}$ при температуре, меньшей температуры плавления (испарение по механизму Ленгмюра), рассчитывается по формуле Дэшмана:

$$V_{\text{тм}} = \frac{10^4}{\gamma_m} \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}} \left(\exp\left(A - \frac{B}{T}\right) - P \right), \quad (3.3.12)$$

где A и B – табулированные константы, значения которых приведены в [59], R – газовая постоянная; γ_m – плотность материала детали; M – молекулярный масса материала; $P_{\text{ост}}$ – остаточное давление газов.

При испарении из слоя расплавленного металла (механизм Френкеля [77]) скорость испарения определяется формулой:

$$V_{\text{ф}} = V_0 \exp\left(\frac{T^*}{T(0,x,y,z,t)}\right), \quad (3.3.13)$$

где V_0 и T^* – критические скорость испарения и температура поверхности [77].

В третьем слагаемом правой части формулы (3.3.9) учитывается изменение энтальпии при фазовом переходе «твердое тело – жидкость» и рассчитывается для того объема материал $V_{\text{пл}}$, в котором текущая температура превышает температуру плавления. Удельная теплота плавления $L_{\text{пл}}$ может быть вычислена по формуле:

$$L_{\text{пл}} = nT_{\text{пл}}f(T_{\text{пл}}) * 4186,8, \quad (3.3.14)$$

где n – число атомов в молекуле; $f(T_{\text{пл}})$ – функция зависимости $L_{\text{пл}}$ от $T_{\text{пл}}$, которую приближенно можно выразить как линейную зависимость вида

$$f(T_{\text{пл}}) = (1,57T_{\text{пл}} + 1428) * 10^{-3}, \quad (3.3.15)$$

Например, для железа $f(T_{\text{пл}}) \approx 3,5$ кал/г. Удельную теплоту плавления $L_{\text{пл}}$ в формуле (3.3.12) измеряют в калориях на грамм.

В четвёртом слагаемом формулы (3.3.9) вычисляется изменение количества тепла под действием лазерного излучения, рассматриваемого как объёмный источник тепла.

В пятом слагаемом формулы (3.3.9) учитывается энергия, затрачиваемая на упругопластическую деформацию тела за время действия теплового источника t_u , а также энергия, возвращаемая материалу при релаксации напряжений (в течение времени, превышающего t_u , но меньшего, чем $t_u + \tau_p$).

Энергию деформации единичного объема определим по формуле:

$$W = G \left[\varepsilon_{xx}^2 + \varepsilon_{yy}^2 + \varepsilon_{zz}^2 + 2(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2) + \frac{\mu}{1-\mu} l^2 - \frac{2(1+\mu)\alpha_1}{1-2\mu} l(T(x, y, z, t) - T) \right], \quad (3.3.16)$$

где $2\varepsilon_{ik} = 2\varepsilon_{ki} = \frac{\partial u_k}{\partial i} + \frac{\partial u_i}{\partial k}$ ($k, i = x, y, z$); $l = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ – объёмная деформация; $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ – линейные деформации (удлинения); $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ – сдвиги относительно соответствующих осей; U_x, U_y, U_z – перемещения относительно соответствующих осей; α_1 – коэффициент линейного расширения материала; μ – коэффициент Пуассона (отношение поперечной деформации к продольной, $0,1 < \mu < 0,5$); G – модуль сдвига (модуль упругости второго рода); для железа, например, $G=3,5 \dots 10,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$, $\mu=0,23 \dots 0,31$; T_n – начальная температура.

Зависимость коэффициента линейного расширения α_1 от температуры может быть аппроксимирована линейной функцией [59].

Деформации сдвигов ε_{ik} не являются независимыми и связаны дифференциальными соотношениями – условиями совместности [31]. Эти условия используются для проверки корректности определения компонент деформации, а их невыполнение компенсируется введением дополнительных полей напряжений. Для определений удлинений $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ и сдвигов $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}$ выражением термоупругого потенциала перемещений Φ :

$$\Delta \Phi - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \frac{\gamma}{G} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{1+\mu}{1-\mu} \alpha_1 [T(x, y, z, t) - T_n], \quad (3.3.17)$$

где γ – плотность материала. По найденному значению термоупругого потенциала перемещений и известным соотношениям теории упругости определяются величины линейных и сдвиговых деформаций [31].

Величины температурных напряжений определим по выражению

$$\sigma_{ik} = 2G \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial i \partial k} - \Delta \Phi \times \delta_{ik} \right), \quad (3.3.18)$$

где δ_{ik} – символ Кронекера, подчиняющийся условиям:

$$\delta_{ik} = 0 \text{ при } i \neq k (i, k = x, y, z); \delta_{ik} = 1 \text{ при } i = k.$$

В шестом слагаемом формулы (3.3.9) учитывается тепловой эффект, связанный с диффузионным переносом массы в температурном поле. Описывается изменение энтальпии элементарного объёма за счёт притока (или оттока) диффундирующих атомов, имеющих температуру, отличную от локальной температуры материала $T(x, y, z, t)$.

В седьмом слагаемом формулы (3.3.9) учитывается влияние термохимических процессов на тепловой баланс в материале.

В случае лазерного облучения многокомпонентного вещества АВ (химического соединения, сплава) в установившемся процессе отношение равновесных концентраций компонентов у поверхности описывается соотношением:

$$\frac{n_{A(0)}}{n_{B(0)}} = \frac{n_{A,V}}{n_{B,V}} \left(\frac{M_A}{M_B} \right)^{1/4}, \quad (3.3.20)$$

где $n_{A,V}$ и $n_{B,V}$ – объемные концентрации атомов А и В в объеме материал. M_A , M_B – их атомные массы.

Таким образом, происходит обогащение приповерхностного слоя более тяжёлым компонентом.

Когда плотность потока частиц n_0 превышает пороговое значение, необходимое для инициирования объемных превращений и формирования модифицированного слоя толщиной более монослоя, скорость реакции достигает насыщения. В этом режиме она определяется исключительно параметрами излучения (плотностью мощности E и коэффициентом σ_p) и перестает зависеть от исходной плотности потока n_0 и температуры:

При высокой плотности потока частиц n_0 , достаточного для формирования скорость реакции определяем только в режиме облучения и не зависит от n_0 и температуры:

$$dN_1/dt = N_0 \sigma_p E/e \text{ при условии } n_0 \tau_1 \gg N_0. \quad (3.3.21)$$

Данное выражение описывает скорость адсорбции частиц и рост модифицированного слоя в условиях интенсивного лазерного воздействия. Превышение порога по плотности потока переводит процесс в режим, ограничивающийся исключительно скоростью активации поверхности и объема излучения, что приводит к развитию реакций вглубь материала. Это свидетельствует о том, что лазерное излучение не только активирует поверхность, увеличивая скорость поверхностных процессов (коэффициент σ_p), но и инициирует послойное преобразование структуры с выборочным обогащением приповерхностного объема более тяжелыми компонентами за счет направленной диффузии и закрепления их в модифицированной основе. Таким образом, формируется градиентная структура с закономерным изменением химического состава и физико-механических свойств по глубине.

3.3.1 Теплообмен на поверхности инструмента

Формирование теплового потока на поверхности мишени обусловлено совокупностью физических процессов, которые можно разделить на три основные группы:

1) Энергетические процессы при столкновениях: поглощение лазерного излучения поверхностью (1-е компонента); термоэлектронная эмиссия (2-я компонента); вторичное испускание фотонов (3-я компонента).

2) Механизмы теплообмена: отвод тепла испаряемыми частицами материала (4-я компонента); перенос энергии жидкой фазой при ее выбросе (5-я компонента); тепловое излучение нагретой поверхности (6-я компонента); отдача энергии конденсированными атомами (7-я компонента).

3) Плазмохимические превращения: взаимодействие лазерного излучения с испаряемым материалом и адсорбированными газами (8-я компонента), сопровождающееся выделением энергии

$$-\lambda[T] \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} = F_{l,r} - F_{\text{расп}} - F_{\text{м.э.}} - [F_{uи.е} + F_{u.ф.э} + F_{u.э.э} + F_{\text{киэ}} + F_{x.ру} + F_{tпу} + F_{nu}]_i - F_{\text{исп}} - F_{\text{пл}} - \sigma \varepsilon T^*(0, y, z, t) \pm F_{\text{конд}} + F_{nx} + \sigma \varepsilon_c T_c^*. \quad (3.3.22)$$

где, σ -постоянная Стефана-Больцмана; ε и ε_c -степень черноты поверхности мишени и среды; T_c -температура среды.

Расчет температурных полей при воздействии лазерного излучения на режущий инструмент выполнялся методом конечных элементов (МКЭ) с использованием специализированного программного обеспечения. Исследование охватывало широкий диапазон параметров воздействия, включая различные плотности теплового потока ($10^5 \dots 10^8 \text{ Вт/м}^2$) и временные интервалы ($10^{-6} \dots 10^{-3} \text{ с}$). Особое внимание уделялось анализу как нагрева, так и последующего охлаждения обработанной поверхности.

Для детального рассмотрения были отобраны только те случаи, которые соответствовали строгим критериям формирования наноструктур: максимальные температуры в диапазоне $500 \dots 1500 \text{ К}$ и скорости нагрева, превышающие 10^7 К/с . Такой подход позволил сосредоточиться на наиболее практичных режимах обработки.

В результате расчетов выявлено образование ярко выраженных локальных зон с экстремальными градиентами температур, достигающими 10^8 К/м . Установлено, что достижение максимальной температуры происходит за предельно короткие промежутки времени ($10^{-6} \dots 10^{-4} \text{ с}$), при этом процесс охлаждения происходит существенно медленнее — характерные времена охлаждения на порядок больше времен нагрева.

Полученные данные температурного моделирования важны для оптимизации процессов лазерной обработки режущего инструмента. Выявленные режимы, обеспечивающие требуемые температурные параметры, соответствуют условиям эффективного формирования наноструктур в поверхностном слое, что подтверждается экспериментальными исследованиями, приведенными в литературе [30, 97, 125]. Особый интерес представляют данные о временных

характеристиках нагрева и охлаждения, которые могут быть использованы для точного управления процессом модификации поверхности.

3.4 Моделирование покрытий дискретного типа в условиях напряженно-деформированного состояния системы «покрытие-основание»

Плотность покрытия дискретного типа определяет эксплуатационную надежность защитного слоя. Особенности эксплуатации режущего инструмента являются локальный характер нагрузки и неравномерность ее износа. При этом возникает задача определения оптимальной площади дискретных участков покрытия по отношению ко всей площади фрикционного контакта, т.е. определить плотность покрытия – ψ .

Критериями выбора конструкции покрытия дискретного типа является уровень напряжений в покрытии, от которого зависит интенсивность износа рабочей поверхности [5]. В свою очередь, уровень напряжений в дискретном покрытии зависит как от его плотности, так и от глубины проникновения легирующих элементов в поверхностный слой основного материала.

Для решения поставленных задач в зависимости от конкретных условий нагружения режущего инструмента разработана модель конструкции покрытия дискретного типа, где исходные параметры определяют физические свойства подложки и покрытия и геометрические параметры дискретных сечений, и их расположение, как относительно поверхности основного материала (подложки), так и относительно друг друга [6].

В зоне соприкосновения стружки с инструментом характерно совместное действие нормальных и тангенциальных сил на плоскость контакта, что вызывает нормальные и тангенциальные контактные напряжения. Напряжения и деформации зависят от действующих сил, упругих свойств материала и геометрических параметров, соприкасающихся тел. Наиболее существенное влияние на износостойкость рабочей поверхности с покрытиями оказывает

напряженно-деформированное состояние покрытия, то есть максимальный износ наблюдается в местах концентрации напряжений [6]. Определяя и минимизируя коэффициенты концентрации напряжений в зависимости от объемного содержания включений, можно определить оптимальную плотность покрытия.

При решении задачи математического моделирования структуры покрытия, которая формируется методом диффузионного насыщения, рассмотрим межфазную границу «основание – покрытие» (рисунок 3.4.1). На рисунке схематически изображены зоны покрытия материала основания в объеме (а) и в плоскости поверхности (б), где P – силы, приложенные по нормали к плоскости контакта и одинаковые, как в точке A_n – центр покрытия, так и в точке A_o основание, равноудаленное от покрытий; точка B – произвольная точка на межфазной границе «покрытие – основа».

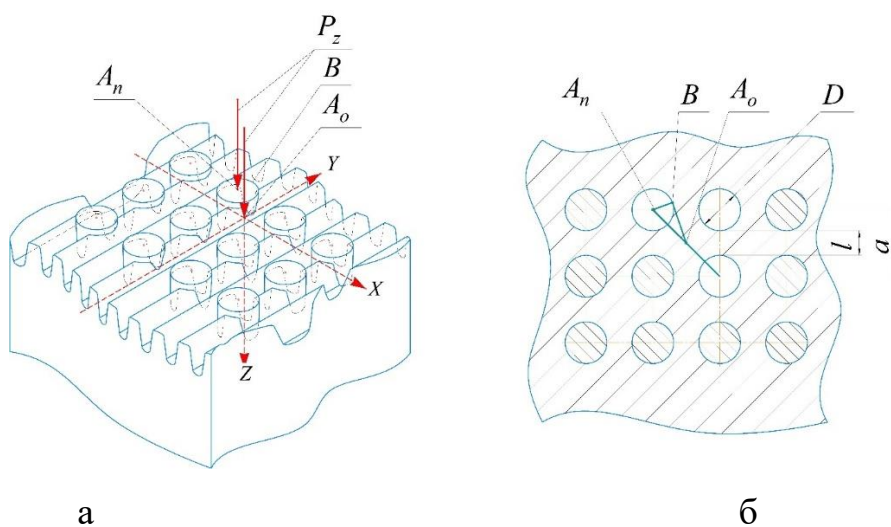


Рисунок 3.4.1 – Схема зоны покрытия: а – в объеме; б – в плоскости поверхности (P — силы, приложенные нормально к плоскости контакта; A_n – центр покрытия; A_o – точка, равноудаленная от покрытия в основании; B – произвольная точка на межфазной границе «покрытие – основание»; D – диаметр покрытия; l – расстояние между ближайшими точками границ покрытия; a – шаг покрытия в основном материале)

Предполагаем, что наибольшая концентрация напряжений на поверхности наблюдается в точках межфазной границы материала включения (рисунок 3.4.2).

Под действием внешней силы P в точках межфазной границы возникают внутренние силы, модуль и направление которых изменяются в зависимости от упругих свойств компонентов и судьбы их содержимого.

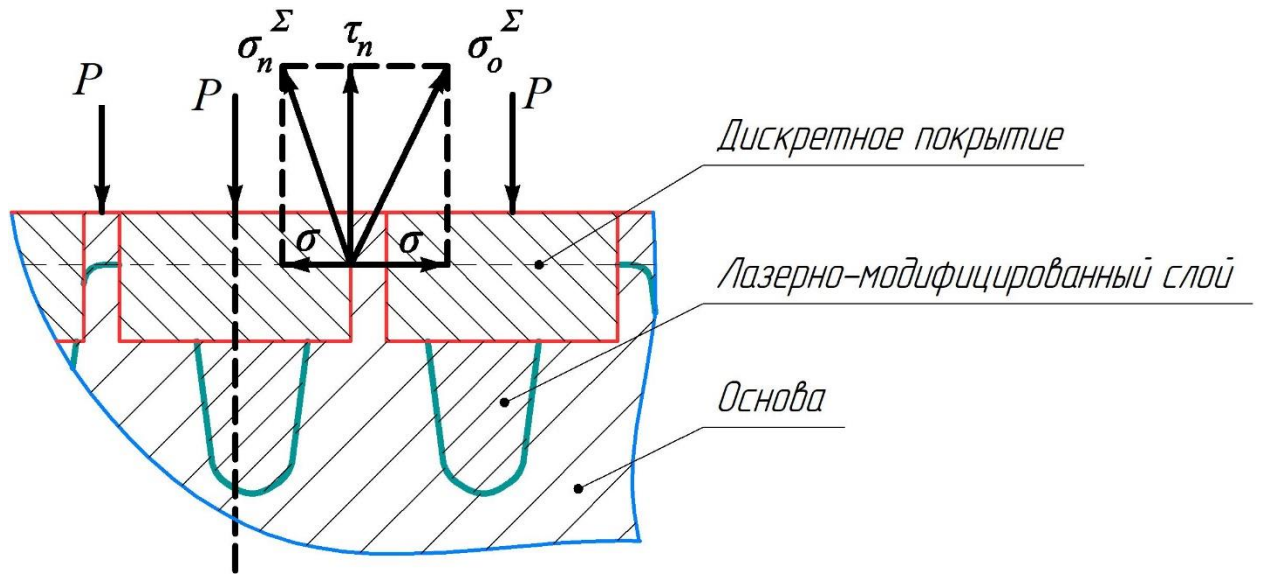


Рисунок 3.4.2 – Схема распределения напряжений в точке на границе «покрытие – основание»

Коэффициенты концентрации растягивающих (сжимающих) напряжений - K_σ и продольного сдвига - K_τ определяются по формулам, которые после преобразований с учетом граничных условий имеют следующий вид:

$$K_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_n} = \frac{4G_o(\nu_o - \nu_n)/E_1}{2 - \nu_o + \nu_n \chi_o + \nu_o \frac{G_o(\chi_n - 1)}{G_n}} \cdot \left\{ 1 - V_n + 3 \frac{\chi_o + 1}{\chi_o + \frac{G_o}{G_n}} \left[3 + 10 \left(\frac{V_n}{\pi} \right)^2 \right] \left(\frac{V_n}{\pi} \right)^2 \right\} \quad (3.4.1)$$

$$K_\tau = \frac{\tau}{\tau_n} = 2 \frac{\frac{G_n}{G_o}}{V_o + (1 + V_n) \frac{G_n}{G_o}} \left\{ 1 + 4 \frac{\frac{G_n}{G_o} - 1}{\frac{G_n}{G_o} + 1} \cdot \left(\frac{V_n}{\pi} \right)^2 \cdot \left[3 + 7 \left(\frac{V_n}{\pi} \right)^2 \right] \right\} \quad (3.4.2)$$

где σ, τ – нормальные локальные напряжения и локальные продольные напряжения сдвига в покрытии; σ_n, τ_n – суммарное напряжение от сжатия и суммарное напряжение от сдвига по фазовым границам компонентов «покрытие – основание» соответственно; G_n, G_o – сдвиговые модули покрытия и основания; ν_n, ν_o – коэффициенты Пуассона; $\chi_n = (4 - 3\nu_n)$; $\chi_o = (4 - 3\nu_o)$; V_o, V_n – относительное объемное содержание основания и покрытия.

Значение E_1 определяется как:

$$E_1 = V_n E_n + V_o E_o, \quad (3.4.3)$$

где E_o , E_n – модуль упругости первого вида материала основания и покрытия.

Распределение напряжений в произвольной точке на границе «покрытие–основание» в покрытиях дискретного типа, возникающих при контактной нагрузке рабочей поверхности режущего инструмента, схематично показано на рисунке 3.4.3.

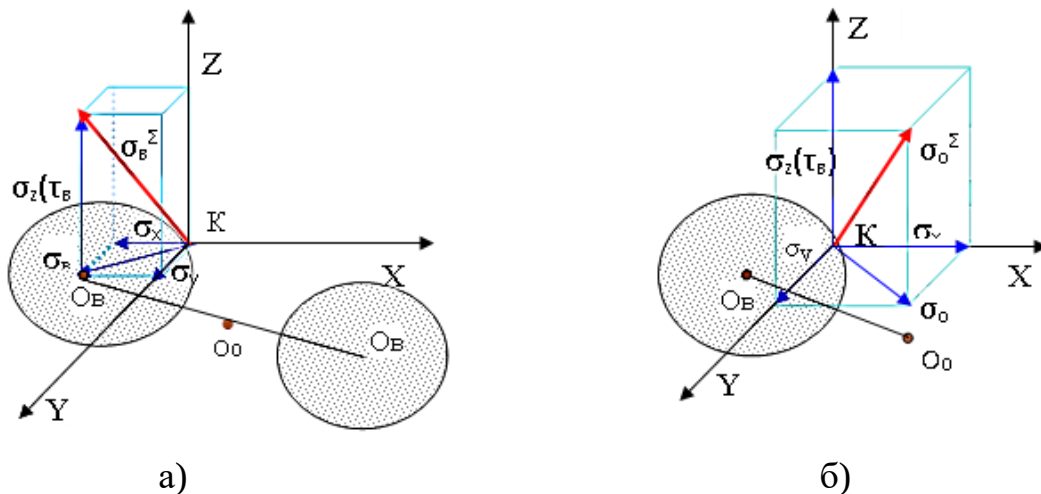


Рисунок 3.4.3 – Схема распределения нормальных напряжений в покрытии в произвольной точке K на границе «покрытие – основание» - (а) и «основание – покрытие» (б)

Поскольку износ режущего инструмента в большей степени зависит от напряжения в поверхностном слое, зная объемное содержание включений, для которых наблюдаются наименьшие концентрации напряжений, можно обеспечить наименьшую величину износа рабочей поверхности.

Плотность покрытия определяется условием минимального значения концентрации напряжений. В соответствии с этими значениями определяются оптимальные доли объемного содержания включений - V_b^{opt} . Объемное содержание включений в основном влияет на концентрации сжимающих (растягивающих) напряжений, вызванных действием нормальных сил, и мало влияет на концентрацию касательных напряжений, вызванных действием сил трения.

Соотношение между объемным содержанием компонентов композиции и соотношением их площадей на поверхности подчиняется принципу Кавальери.

Согласно этому принципу, соотношение площадей компонентов композиции в любом сечении такое же, как и в объеме. Следовательно, объемная плотность покрытия, $\psi_v = \frac{V_v}{V_o}$ где V_v – объемное содержание дискретного покрытия, V_o – общий объем слоя материала системы «базовое покрытие», равный плотности покрытия $\psi = \frac{S_v}{S_o}$, где S_v – площадь поверхности с дискретными покрытиями, а S_o – общая площадь поверхности системы базового покрытия.

Оптимальная плотность, при которой мы имеем наименьшее значение концентрации напряжений $\psi_v^{opt} = \psi^{opt}$. Зная общую площадь поверхности, можно определить площадь покрытия $S_v = \psi^{opt} S_o$.

Шаг покрытия - a получается из условия:

$$a = k_a \sqrt{\frac{\pi D_{max}^2}{4\psi^{opt}}}, \quad (3.4.4)$$

где k_a – коэффициент; D_{max} определяется по формулам [125].

Таким образом, для покрытий, шаг дискретных сечений должны определяться при условии минимальной концентрации напряжений в точках межфазной границы раздела основание-покрытие.

3.5 Моделирование покрытий дискретного типа при условии контактной прочности

При формировании покрытия дискретного типа методами физического осаждения на поверхности режущего инструмента для нанесения покрытия одним из основных преимуществ является то, что несплошной слой разгружается по остаточным напряжениям (уровень последних в покрытиях дискретного типа значительно ниже уровня остаточных напряжений в сплошных покрытиях [38, 78].

При приложении касательных нагрузок к поверхности составляющие напряженного состояния в точках, которые относятся к плоскости контакта (в нашем случае к дискретной области покрытия), выражаются формулами [39]:

$$\sigma_x^D = 2\mu^2 q_{0z} \frac{y}{a_y} \quad (3.5.1)$$

$$\sigma_x^D = 2\mu q_{0z} \frac{y}{a_y} \quad (3.5.2)$$

$$\tau_{zy}^D = \mu q_{0z} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{a_y}\right)^2} \quad (3.5.3)$$

Для точек поверхности за дискретной зоной покрытия у нас есть:

$$\sigma_x^D = 2\mu^2 q_{0z} \left[\frac{y}{a_y} - \sqrt{\left(\frac{y}{a_y}\right)^2 - 1} \right] \quad (3.5.4)$$

$$\sigma_y^D = 2\mu q_{0z} \left[\frac{y}{a_y} - \sqrt{\left(\frac{y}{a_y}\right)^2 - 1} \right] \quad (3.5.6)$$

$$\tau_{zy}^D = 0 \quad (3.5.7)$$

Анализ графиков касательных напряжений в покрытии дискретного типа режущего инструмента по оси y (рисунок 3.5.1) по зависимостям (3.5.1...3.5.7) позволяет сделать вывод о том, что для нескольких дискретных сечений, расположенных рядом, поля напряжений, возникающие вне этих сечений, взаимно компенсируются, и таким образом происходит разгрузка поверхности подложки. В то же время уменьшение общей площади дискретных покрытий по сравнению со сплошным покрытием приводит к увеличению эквивалентного напряжения от действия контактной нагрузки на поверхность дискретных участков покрытия на режущий инструмент.

Результаты исследований показывают, что в зонах нанесения покрытий дискретного типа на режущий инструмент, по сравнению с твердыми покрытиями, наблюдается снижение остаточных напряжений сжатия. Таким образом, нижний предел плотности покрытия на рабочих поверхностях инструмента может быть определен из условия, что эквивалентное напряжение на поверхности контакта с покрытием от действия внешней нагрузки и остаточных напряжений в дискретных покрытиях должно быть меньше допустимого сжимающего напряжения для материала покрытия [39]:

$$\frac{\sigma_{n_{екв}} k_1(D, h)}{\psi} \leq [q_n] \quad (3.5.8)$$

где $\sigma_{n_{екв}}$ - эквивалентные напряжения на поверхности сплошного покрытия от действия внешних контактных и касательных нагрузок и остаточные напряжения в сплошном покрытии; $k_1(D, h)$ – коэффициент, показывающий долю остаточных напряжений в покрытии дискретной структуры заданного размера (D) и толщины (h) относительно остаточных напряжений в сплошном покрытии; ψ - плотность дискретного покрытия; $[q_n]$ — допустимое сжимающее напряжение для материала покрытия.

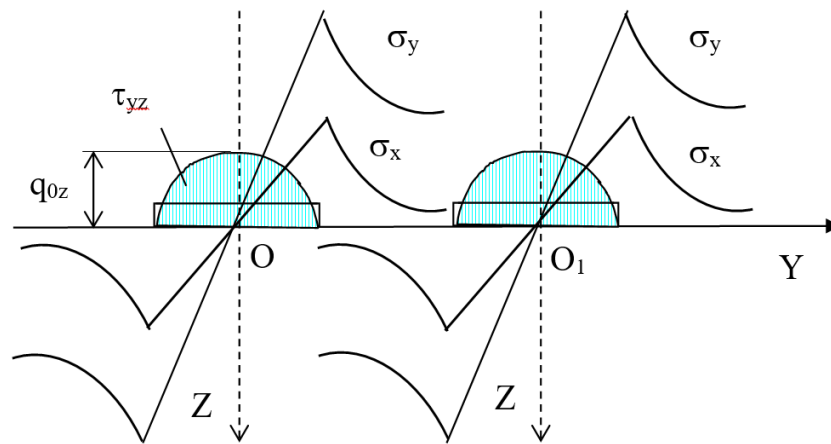


Рисунок 3.5.1 – Эпюры напряжений в покрытии дискретного типа по оси y , обусловленные действием касательной составляющей силы

Верхний предел плотности покрытия определяется тем условием, что в промежутках между участками дискретного покрытия под действием контактной нагрузки наблюдается увеличение напряжений в подложке при сближении этих участков. Эти напряжения должны быть меньше допустимых напряжений сжатия для материала основания:

$$\sigma_{o_{екв}}^K \psi k_2(a) \leq [q_o] \quad (3.5.9)$$

где $\sigma_{o_{екв}}^K$ — эквивалентные напряжения в основании для сплошного покрытия от действия внешней нагрузки; $k_2(a)$ – коэффициент, показывающий, насколько изменяются напряжения в подложке при изменении шага a дискретных областей покрытия; $[q_o]$ – допустимое сжимающее напряжение для материала подложки.

На основании формул (3.5.8), (3.5.9) получаем коэффициент для определения плотности покрытия дискретного типа:

$$\frac{\sigma_{n_{екв}} k_1(D, h)}{[q_n]} \leq \psi \leq \frac{[q_o]}{k_2(a) \sigma_{o_{екв}}^K} \quad (3.5.10)$$

Таким образом, предложенная методика проектирования износостойких покрытий с повышенной адгезионной и когезионной прочностью покрытия на режущем инструменте позволила определить геометрические параметры и плотность покрытия, что позволит повысить его стабильность и повысить эффективность процесса обработки материалов резанием.

Выводы по главе

Разработана комплексная математическая модель, описывающая термические и структурные превращения при лазерной абляции, кинетику формирования дискретных диффузионных покрытий и взаимодействие модифицированных слоев при комбинированной обработке режущего инструмента. Модель позволяет прогнозировать свойства поверхностного слоя и оптимизировать параметры технологических процессов.

Установлено, что процессы лазерной абляции характеризуются сложными многопараметрическими зависимостями, включающими теплоперенос, фазовые превращения и формирование остаточных напряжений. Ключевыми параметрами являются мощность излучения, скорость сканирования и геометрические характеристики формируемой структуры.

Моделирование дискретно-диффузионной модификации поверхности выявило важность анализа массопереноса, формирования градиентных структур и кинетики роста покрытия. Определены оптимальные параметры для минимизации энергозатрат и достижения требуемых эксплуатационных характеристик.

При комбинированной обработке (лазерная абляция с последующим нанесением дискретного покрытия) выявлен синергетический эффект,

обусловленный взаимным влиянием предварительно созданной структуры на адгезию и формирование покрытия.

Разработаны модели теплопередачи, учитывающие поглощение лазерного излучения, термохимические реакции и деформационные процессы. Расчеты показали, что использование импульсного режима лазерной обработки (с длительностью импульса 10^{-9} с) является энергетически выгодным для обработки инструментальных материалов, таких как железо, вольфрам и титан.

Термодинамический анализ реакций в поверхностном слое инструментальной стали при лазерной абляции выявил преобладание упрочняющих процессов (образование оксидов и карбидов) над разупрочняющими в диапазоне температур 400–1000 K, что способствует повышению твердости поверхности.

Моделирование дискретных покрытий показало, что оптимальная плотность покрытия ($\psi \approx 65$ % от площади поверхности) определяется условиями минимизации концентрации напряжений на межфазной границе «покрытие–основание». Это позволяет снизить износ и повысить адгезионную и когезионную прочность покрытия.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Экспериментальные исследования данной работы направлены на изучение комплексной обработки микроструктуры, механических и трибологических свойств инструментальных сталей. Для этого используется комплекс современных методов анализа, включающий электронную микроскопию, профилометрию и механические испытания.

Важнейшей частью является исследование и оптимизация методов формирования долговечных покрытий. В работе предложен инновационный комбинированный метод, включающий предварительную лазерную обработку поверхности с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия. Особое внимание уделено изучению основных параметров лазерной абляции, морфологии поверхности и качеству последующих покрытий.

Полученные экспериментальные данные являются основой для выбора научно обоснованных рекомендаций по созданию оптимальных режимов обработки металлорежущего инструмента. Результаты исследований имеют большое значение для машиностроительной отрасли, так как позволяют увеличить ресурс инструмента и снизить затраты на его использование.

Для решения поставленных в работе задач был использован комплекс методов исследования, который включает в себя:

- аналитические методы механики деформируемого твердого тела;
- электронные микроскопические исследования;
- рентгенофлуоресцентный анализа (РФА);
- исследование контактных явлений на поверхности материала инструмента с покрытиями, в том числе напряжений, сил и коэффициентов трения;
- оценка трибологических характеристик материалов с комбинированным модифицированным покрытием;

- исследование износа инструментальных материалов с комбинированным покрытием.

В разделе представлены методы формирования комбинированных покрытий на рабочих поверхностях режущего инструмента, которые позволяют получать покрытия с заданными конструктивными параметрами и физико-механическими характеристиками. Комплекс экспериментальных методов исследования образцов из инструментальных материалов с модифицированной поверхностью позволяет оценить влияние слоев упрочненной поверхности на основные показатели производительности режущего инструмента. Такой подход позволяет провести системную оценку эффективности предлагаемого метода комплексной модификации поверхности инструмента.

Экспериментальные работы в рамках проведенных исследований проводились в Крымском инженерно-педагогическом университете имени Февзи Якубова на кафедре электромеханики и сварки инженерно-технологического факультета, где выполнялись основные экспериментальные, технологические и вычислительные работы. Исследование силовых характеристик и износа инструмента в процессе резания материалов проводились на кафедре технология машиностроения.

В качестве объектов исследований были выбраны следующие материалы: инструментальная - быстрорежущая сталь Р6М5, однокарбидный вольфрамовый твердый сплав марки ВК8, двухкарбидный титановый вольфрамовый твердый сплав марки Т15К6.

4.1 Разработка технологии повышения износостойкости металлорежущего инструмента

Состояние и свойства приповерхностных слоёв режущих кромок являются определяющими факторами для эксплуатационной стойкости и общей работоспособности инструмента. В этой связи критически важной научно-

технической задачей становится проектирование новых и кардинальное совершенствование существующих технологий, направленных на формирование поверхностного слоя с заданными функциональными характеристиками для повышения производительности и ресурса резания.

Одним из наиболее перспективных методов такой обработки является лазерная абляция – процесс удаления вещества с поверхности материала под воздействием лазерных импульсов нано- или фемтосекундной длительности, приводящий к его мгновенному испарению или сублимации с образованием плазмы, состоящей из свободных атомов, ионов, молекул, кластеров и наночастиц [88, 100, 104–108, 110, 115, 119, 124]. Высокая кинетическая энергия этих продуктов абляции обеспечивает их эффективное удаление из зоны воздействия. Важнейшей особенностью процесса является возможность управления химическим составом формируемого слоя: взаимодействуя с контролируемой технологической средой (кислород, азот, углеводороды), активные частицы плазмы инициируют реакции синтеза, позволяя целенаправленно проводить процессы поверхностного оксидирования, азотирования или карбидирования.

Современные лазерные технологические комплексы обеспечивают управление ключевыми параметрами воздействия – мощностью, плотностью энергии, длительностью и частотой следования импульсов в широком диапазоне (от нано- до фемтосекунд) [88, 100, 104–108, 110, 115, 119, 124]. Это делает лазерную абляцию уникальным инструментом для формирования микро- и наноструктур с заданной геометрией и свойствами на поверхности инструмента.

Высокая эффективность и локализованность лазерного воздействия обусловлены возможностью точной фокусировки энергии в предельно малом объёме материала. Однако реализация этого потенциала напрямую зависит от корректности выбора технологических режимов, которые определяются комплексом факторов: оптическими (коэффициент поглощения, отражения) и теплофизическими (теплопроводность, теплоёмкость) свойствами обрабатываемого материала, энергетическими параметрами лазерного излучения и составом технологической газовой среды.

Методика определения технологического режима заключается в выявлении оптимальных параметров абляции, обеспечивающих требуемые глубину обработки и шероховатость поверхности. Таким образом, методика включает в себя следующие этапы:

1. Оценка коэффициента поглощения материала на рабочей длине волны.
2. Расчет коэффициента перекрытия и плотности следования излучения.
3. Определение схемы сканирования при абляции.
4. Расчет энергии (мощности) импульса.
5. Расчет скорости обработки.
6. Расчет частоты следования импульсов.
7. Расчет длительности импульсов.
8. Расчет количества проходов.
9. Подбор технологической среды обработки (газов, жидкостей).
10. Проведение процесса абляции режущего инструмента.
11. Измерение глубины зоны обработки.
12. Измерение шероховатости поверхности.
13. Исследование микро- и наноструктуры поверхности.
14. Определение механических свойств модифицированного слоя.

По результатам проведённых экспериментов строятся графики зависимости показателей эффективности обработки (глубины, шероховатости, твёрдости) от мощности (или энергии) излучения.

Экспериментальные исследования по модифицированию поверхности методом лазерной абляции были проведены на установке «Fmark-100 NS» с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.1.1.), рабочая длина волны излучения составляет 1,064 мкм, максимальная мощность –100 Вт, длительность импульсов 4 – 200 нс, частота импульсов 40 – 200 кГц. Схема обработки металлорежущего инструмента лазерным излучением представлена на рисунке 4.1.2.



Рисунок 4.1.1 – Экспериментальная установка «Fmark-100 NS»

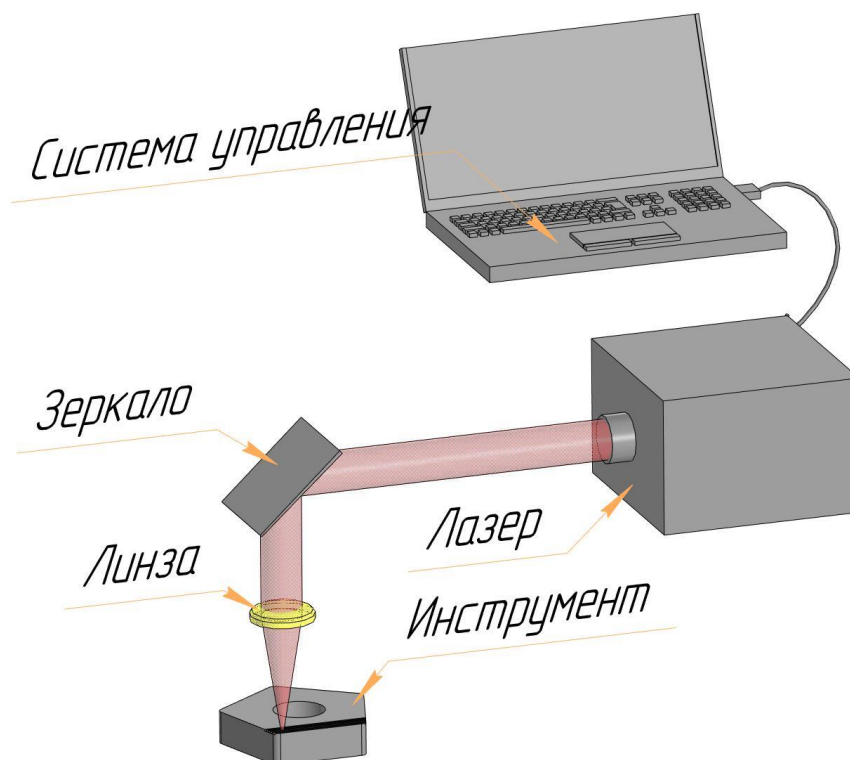


Рисунок 4.1.2 – Схема обработки металлорежущего инструмента лазерным излучением

Технический результат достигается тем, что лазерную обработку передней поверхности режущей кромки резца осуществляют в два этапа, где первоначально обрабатывают в два прохода участок параллельно вспомогательной режущей кромке при помощи волоконного иттербиевого источника на длине волны $\lambda - 1064$ нм, при этом на первом проходе устанавливаются расчетные режимы (скорость движения луча, мощность, длительность импульсов, частота импульса, плотность сплошной обработки, направление обработки), а на втором проходе режимы обработки (скорость движения луча и мощность излучения) устанавливают на значения на 75-80 % меньше чем в первом проходе, где затем на втором этапе осуществляется обработка в два прохода сплошной полосой лазерной обработки параллельно главной режущей кромке на аналогичных режимах.

В результате пересечения сплошных полос при лазерной обработке создается участок с упорядоченной структурой (ромбовидная сетка), характеризующаяся углом α , зависящая от геометрии резца, а именно угла между главной и вспомогательной режущими кромками, что приводит к локальному изменению свойств материала с образованием функциональных микро- и наноструктур вблизи вершины резца (рисунок 4.1.3).

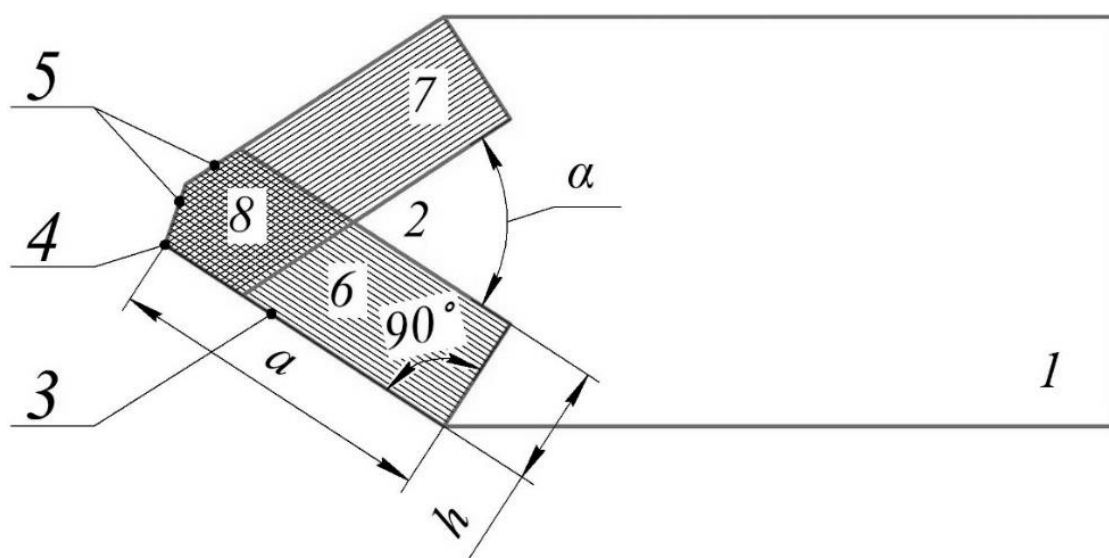


Рисунок 4.1.3 – Схема формирования структуры вдоль главной и вспомогательной режущих кромок пластины резца, выполненной по специальной геометрии

На рисунке 4.1.3 представлена схема формирования структуры вдоль главной и вспомогательной режущих кромок пластины резца, выполненной по специальной геометрии с обозначением необходимых параметров, где 1 – резец специальной геометрии, 2 – передняя поверхность, 3 – главная режущая кромка, 4 – вершина резца, 5 – вспомогательная режущая кромка, 6 и 7 – полосы сплошной лазерной обработки, 8 – образованный участок пересечений полос сплошной лазерной обработки, a – длина полосы сплошной лазерной обработки, h – ширина полосы сплошной лазерной обработки, α – угол между полосами сплошной лазерной обработки.

В результате пересечения сплошных полос при лазерной обработке создается упорядоченная структура (ромбовидная сетка), характеризующаяся углом α , который зависит от специальной геометрии резца 1, а именно угла между главной 3 и вспомогательной режущими кромками 5. В результате образуется функциональная микро- и наноструктура, которая увеличивает износостойкость резца, стабилизирует процесс резания и снижает шероховатость обрабатываемого материала за счет влияния следующих эффектов: 1. Уменьшение адгезионной связи с обрабатываемым материалом за счет уменьшения площади контакта между стружкой и передней поверхностью резца. 2. Уменьшение сил трения и температуры за счет удерживания в микроструктуре смазочно-охлаждающей жидкости, создавая тем самым эффект гидродинамической смазки. 3. Контроль стружкообразования за счет работы ячеек с острыми краями как стружколом. 4. Эффективный теплоотвод за счет увеличения площади поверхностей режущих кромок резца. 5. Уменьшение вибраций за счет изменения характера взаимодействия образованной стружки с передней поверхностью резца.

Отличительные существенные признаки данной технологии заключаются в:

1. Создание структуры осуществляют полосой сплошной лазерной обработки шириной равной площадке абразивного износа и параллельно главной и вспомогательной режущим кромкам по передней поверхности. Наличие регулярной и направленной микроструктуры на главной режущей кромке уменьшает длину контакта между заготовкой и режущей кромкой резца,

удерживает смазочно-охлаждающую жидкость, что приводит к снижению коэффициента трения, силы резания и температуры в зоне резания. Это в свою очередь способствует увеличению стойкости резца к абразивному износу.

2. Воздействие излучения на переднюю поверхность резца осуществляется в два прохода, что способствует образованию на поверхности регулярной пирамидальной микроструктуры покрытой наноструктурированным слоем, образованного из карбида основного материала вследствие замещения атомов углерода в карбидах на атомы кислорода и/или азота, у которых плотность выше, чем основной материал резца, что в свою очередь приводит к изменению адгезионных составляющих поверхности, изменению поверхностной структуры материала и увеличению стойкости резца к таким видам износа как: адгезионного, диффузионного, химического и термдеформационного.

3. Пересечение полос сплошной лазерной обработки у вершины резца образует участок с перекрёстной шероховатостью, при этом уменьшая среднеарифметическое отклонения профиля R_a и увеличивая поверхностную твердость резца.

Перечисленные новые существенные признаки в совокупности с известными позволяют получить технический результат повышения стойкости инструмента (Приложение А).

На основе полученных моделей были установлены граничные технологические режимы для проведения экспериментальных исследований лазерной абляции быстрорежущей стали Р6М5, твердосплавных пластин из сплавов ВК и Т15К6 представлены в таблице 4.1.1.

Таблица 4.1.1 – Граничные технологические режимы обработки при лазерной абляции.

№ п/п	Мощность импульса Р, Вт	Частота импульса кГц	Схема сканирования
1	5-35	10-150	Параллельное/Перекрёстное

4.2 Разработка технологии формирования дискретного диффузионного покрытия

В целях комплексного повышения эксплуатационных характеристик металлорежущего инструмента разработана комбинированная технология, ключевой особенностью которой является формирование дискретного диффузионного покрытия на поверхностях, предварительно активированных методом лазерной абляции. Данный процесс основан на двух основных принципах: создании условий для интенсивного диффузионного насыщения активированного поверхностного слоя и формировании упорядоченной системы изолированных локальных областей покрытия.

Технологическая реализация первого принципа достигается с помощью направленного потока воздуха, активированного в зоне униполярного коронного разряда при атмосферном давлении. Второй принцип обеспечивается специальной конструкцией сопла, ограничивающей область обработки размерами одной локальной зоны, и системой точного позиционирования инструмента.

Экспериментальные исследования включают комплекс современных методов анализа:

1. Электронная микроскопия для изучения морфологии поверхности.
2. Рентгеноструктурный анализ фазового состава.
3. Механические и трибологические испытания.

Особое внимание уделяется оптимизации следующих основных параметров процесса:

1. Ток и напряжение на коронирующем электроде.
2. Давление воздушного потока.
3. Расстояние и угол наклона сопла к поверхности.
4. Время обработки локального участка.

Разрабатываемая технология имеет значительный практический потенциал, так как позволяет:

1. Существенно упростить процесс нанесения покрытия.

2. Достичь высокой адгезионной прочности за счет предварительной лазерной обработки.

3. Обеспечить контролируемое формирование дискретных зон с улучшенными трибологическими свойствами.

Для экспериментальной реализации разработанной технологии формирования дискретного диффузионного покрытия была применена установка, собранная на базе устройства для создания ионизированного воздушного потока «УИВ-1» (патент № 2279962) и электромеханического блока электроэрозионного станка «Эльфа». Данная комбинация обеспечила возможность нанесения локального покрытия на режущий инструмент в условиях, экологически безопасных для окружающей среды и здоровья оператора. Устройство «УИВ-1» [82] формировало на поверхности образца локальную область диффузионного покрытия, а электромеханический блок позволял создавать упорядоченную совокупность таких областей, разделённых промежутками без покрытия. Полученная структура определена в работе как локальное (ячеистое) покрытие. Внешний вид применённой в исследованиях установки представлен на рисунке 4.2.1.

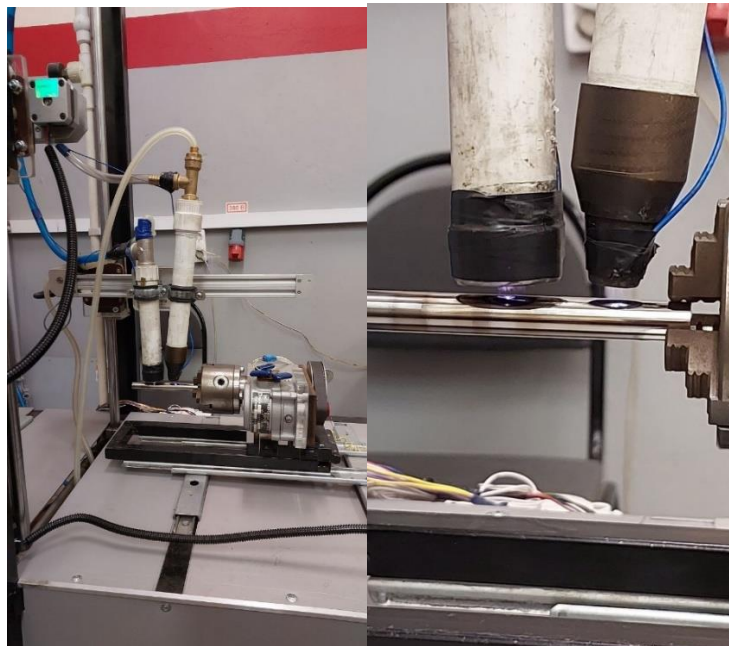


Рисунок 4.2.1 – Оборудование для синтеза диффузионного дискретного оксидного слоя

4.3 Исследование технологических факторов нанесения дискретного диффузионного покрытия на режущий инструмент

Выбор технологических параметров для нанесения дискретного диффузионного покрытия основывался на результатах системного исследования влияния геометрических и физических факторов процесса на конечные эксплуатационные свойства модифицированного инструмента представленных в работе Чекаловой Е.А. [84].

В качестве объектов исследования использовались образцы из инструментальных быстрорежущих сталей (P6M5, P6M5K5), твердых сплавов (IC3028, IC50M) и концевые фрезы из сплава BK10XOM, прошедшие стандартизированную подготовку с контролем микротвердости (разброс не более 5-7% от нормативных значений ($H_{\mu}^{50} = 860-870$)).

Критическое влияние на формирование качественного покрытия оказывают геометрические параметры взаимодействия струи активированного потока с поверхностью: угол наклона сопла (α) и расстояние от сопла до обрабатываемой поверхности (L_c). Экспериментальные исследования, результаты которых представлены на рисунках 4.3.1 и 4.3.2, позволили установить оптимальные значения данных параметров. Наименьший износ инструмента (на примере пластины IC50M при точении стали 40X) наблюдался при расстоянии $L_c = 12$ мм и угле наклона $\alpha = 70-80^\circ$.

Данные параметры обеспечивают:

- равномерное формирование диффузионного слоя без локальных перегревов (возникающих при $L_c < 10$ мм из-за избыточной концентрации потока) и без чрезмерного распыления и снижения интенсивности процесса (при $L_c > 12$ мм);
- максимальную адгезию покрытия к основе за счет оптимального распределения энергии и модифицирующих элементов по поверхности;
- воспроизводимость результатов для различных типов инструментальных материалов.

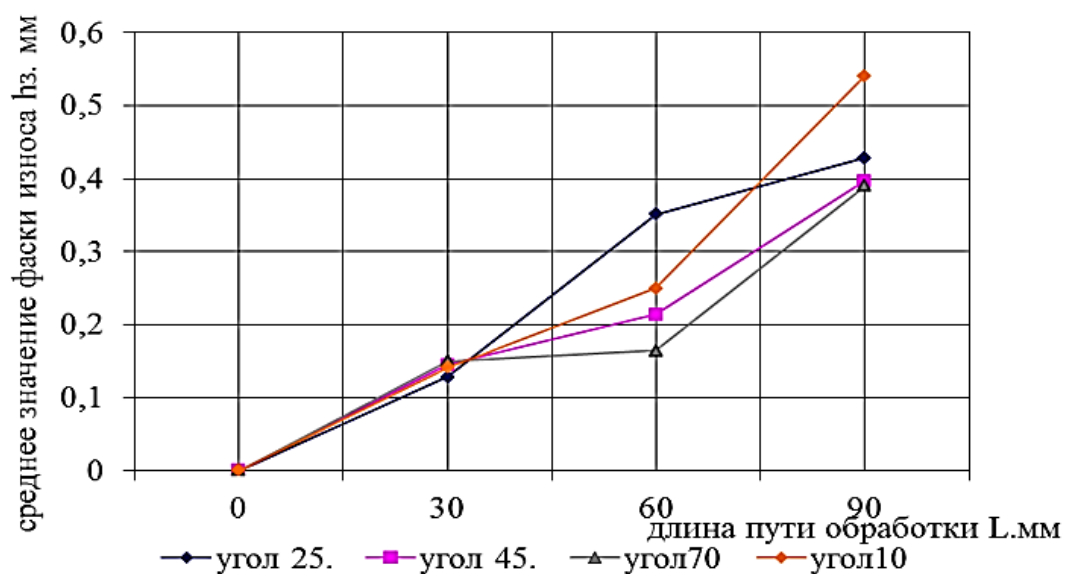


Рисунок 4.3.1 – Влияние расстояния от сопла до образца на износ по задней грани твердосплавной пластины IC50M при точении стали 40X (220 HB): на режимах $v = 190$ м/мин; $s = 0,4$ мм/об.; $t = 2$ мм [84]

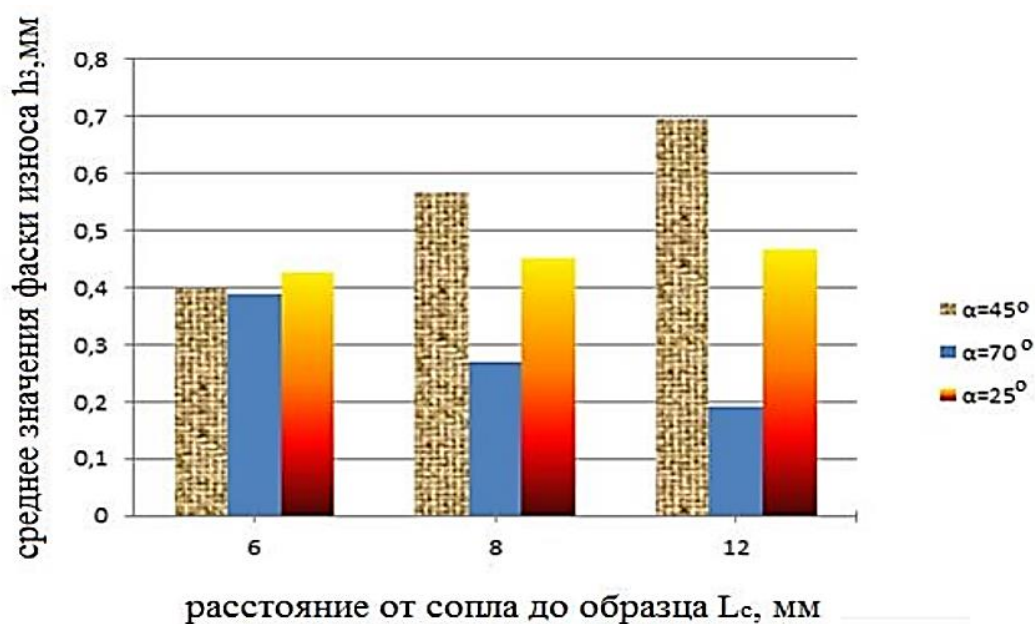


Рисунок 4.3.2 – Влияние угла наклона сопла до образца на износ по задней грани твердосплавной пластины IC50M при точении стали 40X (220 HB): на режимах $v = 190$ м/мин; $s = 0,4$ мм/об.; $t = 2$ мм [84]

На основании этих выводов для всех последующих экспериментов были зафиксированы геометрические параметры: расстояние от сопла 12 мм под углом 75° (как среднее значение оптимального диапазона).

Что касается физических параметров процесса, то после анализа предварительных экспериментов и данных литературы [45, 81, 82, 84] для обеспечения требуемой толщины, структуры и диффузионной насыщенности покрытия были выбраны следующие режимы:

- 1) Напряжение на разрядном устройстве: 60 кВ.
- 2) Сила тока коронного разряда: 770 мА.
- 3) Давление сжатого воздуха, подаваемого в сопло: 3.2 Па.
- 4) Длительность обработки: 60 минут.

Данный комплекс параметров (геометрических: $L_c=12$ мм, $\alpha=75^\circ$; и физических: $U=60$ кВ, $I=770$ мА, $p=3.2$ Па, $t=60$ мин) был принят в качестве базового технологического режима для нанесения дискретных диффузионных покрытий в рамках настоящего исследования, так как он гарантирует формирование покрытия с прогнозируемыми высокими трибологическими свойствами и износостойкостью.

В результате работы была разработана технология формирования дискретного диффузионного покрытия, основанная на комбинированном методе: предварительной лазерной абляции поверхности с последующим локальным осаждением модифицирующего слоя с помощью активированного коронным разрядом воздушного потока. Для реализации процесса была создана экспериментальная установка на базе устройства «УИВ-1» и блока «Эльфа», обеспечивающая экологически безопасное формирование упорядоченной ячеистой структуры покрытия с высокой адгезией к подложке.

Проведённые исследования позволили установить и обосновать оптимальные технологические параметры процесса. Наилучшие эксплуатационные свойства (минимальный износ) достигаются при геометрических параметрах: расстоянии от сопла до поверхности 12 мм и угле наклона 75° . В качестве базового физического режима приняты: напряжение 60 кВ, ток 770 мА, давление воздуха 3.2 Па и время обработки 60 минут. Данный комплекс условий обеспечивает равномерное формирование диффузионного слоя, максимальную адгезию и воспроизводимость результатов для различных инструментальных материалов.

4.4 Экспериментальные исследования характеристик режущего инструмента при лазерной абляции и нанесении дискретного диффузионного покрытия

Современные технологии обработки материалов предъявляют повышенные требования к износостойкости металлорежущего инструмента. Одним из перспективных направлений модификации поверхности инструментальных сталей является комбинированное применение лазерной абляции и дискретного диффузионного покрытия. Такой подход позволяет целенаправленно изменять микроструктуру поверхностного слоя, формируя зоны с повышенной твердостью и износостойкостью при сохранении вязкости основы.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки технологий, обеспечивающих увеличение ресурса режущего инструмента без существенного увеличения себестоимости его изготовления. Особый интерес представляет изучение синергетического эффекта сочетания лазерной обработки, создающей регулярную микрорельефную структуру, и последующего нанесения дискретного диффузионного покрытия, обеспечивающего дополнительное легирование поверхностного слоя.

В данной главе представлены результаты комплексных исследований влияния параметров лазерной абляции и характеристик диффузионного покрытия на микроструктуру, механические и трибологические свойства инструментальных сталей. Особое внимание уделено анализу взаимосвязи технологических режимов обработки и эксплуатационных характеристик модифицированного инструмента.

Методологической основой исследований стали современные методы анализа материалов, в том числе электронная микроскопия, рентгенофлуоресцентный анализа, профилометрия и механические испытания. Полученные данные позволяют установить оптимальные параметры комбинированной обработки, обеспечивающие повышение износостойкости режущего инструмента в условиях эксплуатационных нагрузок.

4.5 Экспериментальные исследования модифицирования поверхности методом лазерной абляции

Экспериментальные исследования модифицирования поверхности методом абляции были проведены на экспериментальной установке «Fmark-100 NS» с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.1.1), рабочая длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальная мощность – 100 Вт, длительность импульсов 4 – 200 нс, частота импульсов 1,6 – 500 кГц. Схема обработки металлорежущего инструмента лазерным излучением представлена на рисунке 4.1.2.

Изменение шероховатости и глубины обработки лазерным излучением проводились на портативном измерителе шероховатости TR200 с помощью датчика TS100 при отклонении параметра R_a не более 0,5%.

Технологические режимы для проведения экспериментальных исследований лазерной абляции твердосплавных пластин ВК3М и Т15К6 представлены в таблице 4.5.1 и 4.5.2.

Таблица 4.5.1 – Режимы лазерной абляции режущих пластин ВК3М на воздухе: скорость обработки $V = 200$ мм/с, длительность импульса $\tau = 200$ нс, плотность заливки $D = 40$ лин/мм, количество проходов $n = 10$, шероховатость поверхности до обработки $Ra=0,63$ мм

№ п/п	Мощность импульса $P, Вт$	Частота импульса $f, кГц$	Глубина обработки $t, мкм$	Шероховатость поверхности $Ra, мкм$	Схема сканирования
1	5	10	5	1,6	Параллельное
2	10	10	5	1,7	Параллельное
3	15	10	10	1,9	Параллельное
4	20	10	5	2,1	Параллельное
5	25	10	20	2,15	Параллельное
6	30	10	30	2,2	Параллельное
7	5	50	5	1,9	Параллельное

№ п/п	Мощность импульса <i>P, Вт</i>	Частота импульса <i>f, кГц</i>	Глубина обработки <i>t, мкм</i>	Шероховатость поверхности <i>Ra, мкм</i>	Схема сканирования
8	10	50	5	2	Параллельное
9	15	50	10	2,1	Параллельное
10	20	50	10	2,15	Параллельное
11	25	50	10	2,2	Параллельное
12	30	50	40	2,25	Параллельное

Таблица 4.5.2 – Режимы лазерной абляции режущих пластин Т15К6 скорость обработки $V = 200 \text{ мм/с}$, длительность импульса $\tau = 200 \text{ нс}$, плотность заливки $D = 50 \text{ лин/мм}$, количество проходов $n = 10$, шероховатость поверхности до обработки $Ra = 0,63 \text{ мм}$

№ п/п	Мощность импульса <i>P, Вт</i>	Среда обработки	Частота импульса <i>f, кГц</i>	Схема сканирования	Глубина обработки <i>t, мкм</i>	Шероховатость <i>Ra, мкм</i>
1.	10	Воздух	50	Параллельное	2	3,7
2.	15	Воздух	50	Параллельное	3	5
3.	20	Воздух	50	Параллельное	5	6,5
4.	25	Воздух	50	Параллельное	8,8	7,9
5.	10	Воздух	50	Перекрестное	2	4,7
6.	15	Воздух	50	Перекрестное	4	5,6
7.	20	Воздух	50	Перекрестное	6	6,7
8.	25	Воздух	50	Перекрестное	9,3	8
9.	10	Вода	50	Параллельное	0,6	0,8
10.	15	Вода	50	Параллельное	1	1,2
11.	20	Вода	50	Параллельное	1,5	1,5
12.	25	Вода	50	Параллельное	1,8	1,9
13.	10	Вода	50	Перекрестное	0,8	1,5
14.	15	Вода	50	Перекрестное	1,2	1,7
15.	20	Вода	50	Перекрестное	1,7	2
16.	25	Вода	50	Перекрестное	2	2,2

На основании полученных экспериментальных данных строим графики зависимости глубины обработки от мощности излучения и графики зависимости шероховатости поверхности от мощности излучения.

Из графика на рисунке 4.5.1 видно, что чем больше мощность лазерного излучения, тем больше толщина снимаемого слоя. Обрабатываемая среда – вода снижает глубину обработки. Химический состав режущих пластин из твердого сплава оказывает влияние на толщину снимаемого слоя. При перекрестной схеме направления абляции толщина снимаемого слоя больше, чем при параллельной.

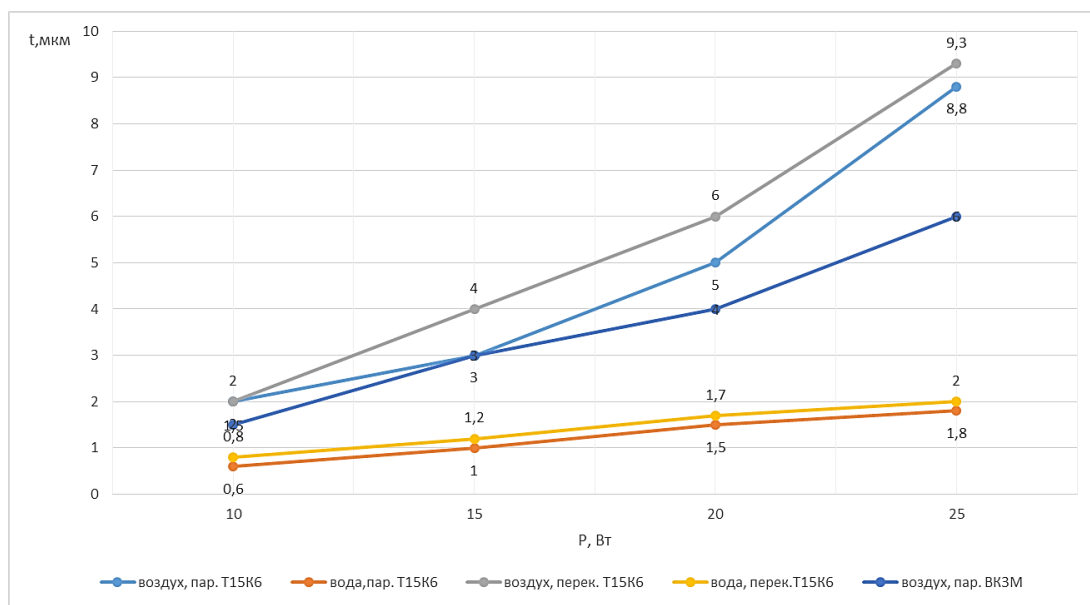


Рисунок 4.5.1 – Влияние мощности лазерного излучения P на глубину обработки t

Важной характеристикой, оказывающей существенное влияние на износ режущих инструментов, является высота неровностей модифицированной поверхности (рисунок 4.5.2). Анализ полученных экспериментальных данных позволяет установить следующие закономерности:

1. Влияние мощности излучения. Наблюдается прямая зависимость между мощностью лазерного излучения и средней высотой неровностей с ростом мощности шероховатость поверхности увеличивается. Минимальные значения шероховатости достигаются при использовании режимов с малой импульсной энергией.

2. Влияние технологической среды. Обработка в жидкой среде (вода) приводит к существенному снижению шероховатости по сравнению с обработкой в воздухе, что обусловлено эффектами кавитационного выноса продуктов абляции и интенсивного охлаждения.

3. Влияние материала основы. Химический состав и микроструктура твердого сплава (например, соотношение фаз карбида вольфрама и кобальтовой связки) оказывают значимое влияние на формируемый микрорельеф.

4. Влияние схемы обработки. При использовании перекрестной схемы сканирования лазерного луча величина шероховатости оказывается выше, чем при параллельной схеме, что связано с эффектом многократного термоциклирования материала в зонах пересечения траекторий.

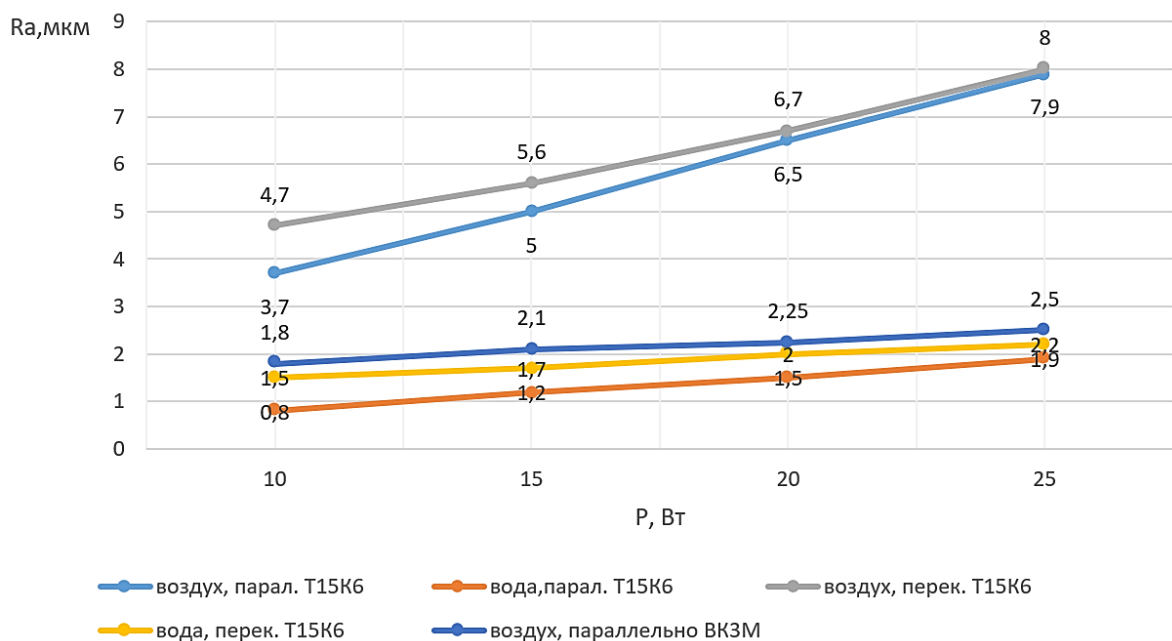


Рисунок 4.5.2 – Изменение параметра шероховатости Ra на поверхности пластин в зависимости от мощности лазерного излучения

Одним из ключевых параметров, влияющих на результаты обработки, является частота следования лазерных импульсов. На рисунке 4.5.3 представлена зависимость шероховатости поверхности пластин из сплава ВКЗМ от мощности излучения при различных значениях частоты. Анализ графика подтверждает наличие выраженной тенденции: с увеличением частоты импульсов при

постоянной средней мощности наблюдается рост шероховатости обработанной поверхности. Это объясняется сокращением времени между импульсами, что приводит к накоплению тепла, меньшему отводу расплава и, как следствие, формированию более выраженных неровностей вследствие повторного плавления и неравномерной кристаллизации.

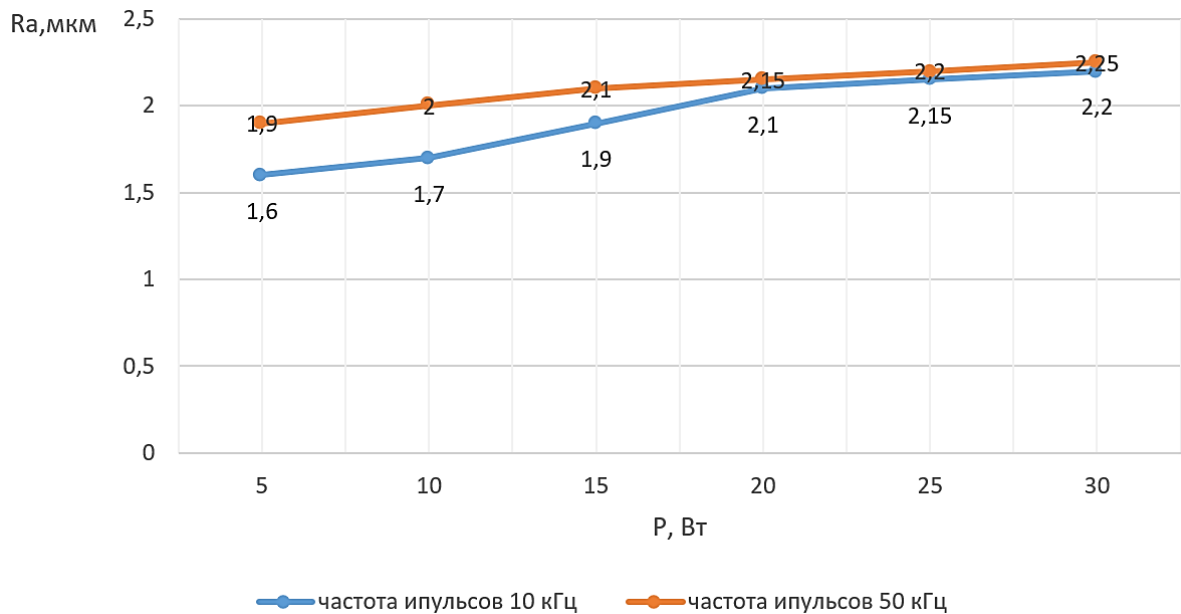


Рисунок 4.5.3 – Зависимость шероховатости Ra поверхности пластин ВКЗМ при лазерной обработке с различной частотой импульсов и мощностью P

Оптимальные технологические режимы лазерной абляции металлорежущего инструмента определяются, прежде всего, тремя ключевыми параметрами: плотностью мощности излучения, длительностью импульса и коэффициентом перекрытия (шагом сканирования).

Анализ экспериментальных зависимостей глубины обработки от мощности излучения свидетельствует о наличии прямой корреляции: с ростом мощности лазерного излучения увеличивается толщина удаляемого (модифицированного) слоя. Данная закономерность обусловлена ростом плотности подводимой энергии, что приводит к более интенсивному испарению и плазмохимическим процессам в зоне воздействия.

Исследования влияния технологической среды показали, что проведение лазерной абляции в жидкости (например, в воде) приводит к значительному снижению как глубины обработки, так и шероховатости формируемой поверхности по сравнению с обработкой на воздухе. Этот эффект объясняется охлаждающим и демпфирующим действием жидкости, а также изменением условий взаимодействия плазмы с материалом.

Анализ графиков зависимости шероховатости поверхности от мощности излучения выявляет однозначную тенденцию: величина шероховатости возрастает с увеличением мощности лазерного импульса. Минимальные значения шероховатости, соответствующие наиболее гладкой поверхности, наблюдаются в области малых значений мощности, при которых преобладают процессы мягкого испарения и плавления без интенсивного выброса расплава и образования кратера.

4.6 Экспериментальные исследования морфологии модифицированного режущего инструмента

Повышение износостойкости контактных поверхностей металлорежущего инструмента достигается за счёт применения технологий поверхностного упрочнения, среди которых можно выделить методы химико-термической обработки, пластического деформирования, нанесения износостойких покрытий и направленной модификации структурно-фазового состояния приповерхностного слоя [20, 68].

Целью настоящей работы является разработка научно-технических основ повышения эксплуатационных характеристик инструмента из быстрорежущих сталей методами импульсно-периодического лазерного воздействия наносекундной длительности, обеспечивающего формирование наноструктурированного поверхностного слоя с заданными свойствами.

Экспериментальные исследования нанесения износостойких покрытий методом абляции в жидкости были проведены на экспериментальной установке

МиниМаркер 2–20А4 с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.6.1). Максимальная энергия в импульсе – 1 мДж, рабочая длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальная мощность – 20 Вт, длительность импульсов 4–200 нс, частота импульса в экспериментах – 100 кГц.



Рисунок 4.6.1 – Экспериментальной установка на основе волоконного иттербиевого лазера МиниМаркер 2-20А4 (IPG Photonics)

Параметры режимов лазерной абляции пластин токарных резцов из быстрорежущей стали Р6М5, проведённой в водной среде, представлены в таблице 4.6.1.

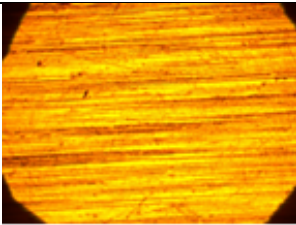
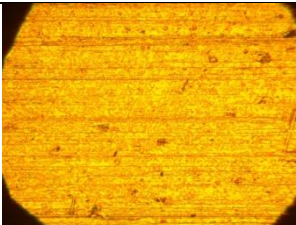
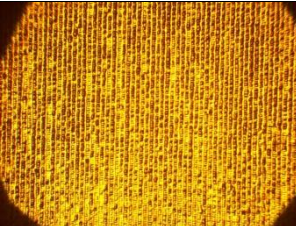
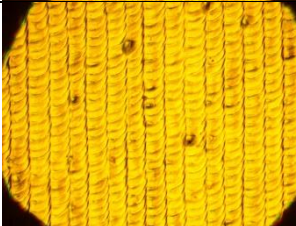
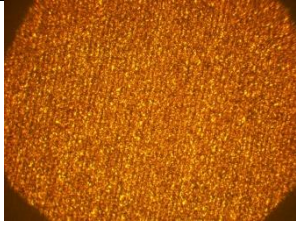
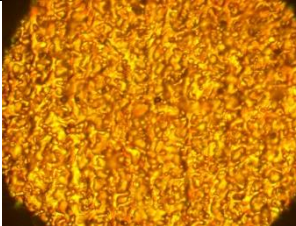
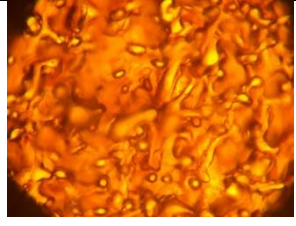
Таблица 4.6.1 – Режимы лазерной абляции пластин

№	Материал пластины	Мощность импульса $P, Вт$	Скорость обработки $V, м/с$	Количество проходов	Длительность импульсов, $нс$	Шаг абляции $лин/мм$	Частота импульса $кГц$
1	Р6М5	10	800	50	10	50	200
2		15	800	50	10	50	200
3	Р6М5	5	800	50	10	50	200
4		10	800	20	10	20	200
5	Р6М5	15	800	20	10	20	200
6		5	800	20	10	20	200

Морфология полученных поверхностей исследовалась с помощью металлографического микроскопа «4XB» при увеличениях $\times 250$, $\times 650$ и $\times 1250$. Результаты исследований в виде микрофотографий представлены в таблицах 4.6.2 и 4.6.3.

Анализ морфологии поверхности экспериментальных образцов позволяет заключить, что модифицирование поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 лазерными импульсами наносекундной длительности как на воздухе, так и в жидкой среде является перспективным методом для повышения его стойкостных характеристик. Общий вид режущих пластин из материала Р6М5 после лазерной абляции представлен на рисунке 4.6.2.

Таблица 4.6.2 – Морфология поверхности пластин из стали Р6М5 после лазерной абляции на воздухе

№	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении $\times 250$	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении $\times 650$	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении $\times 1250$
Необработанна			
1			
2			

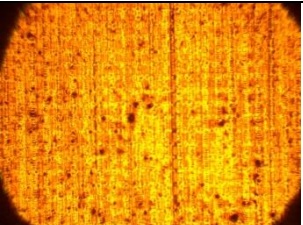
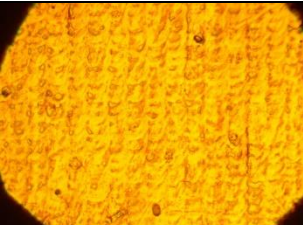
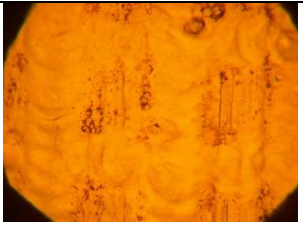
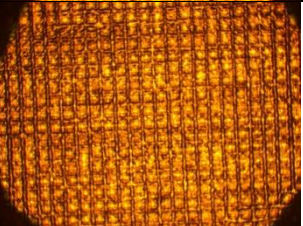
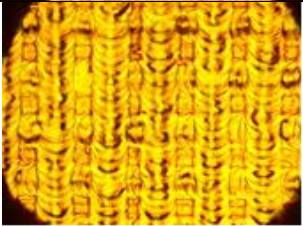
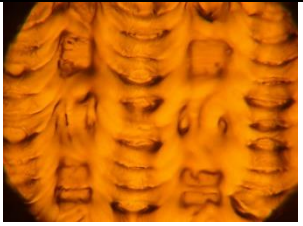
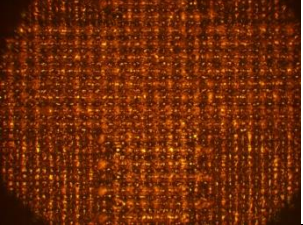
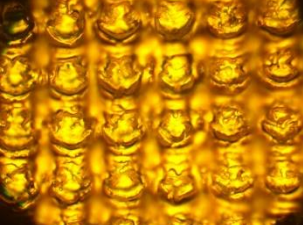
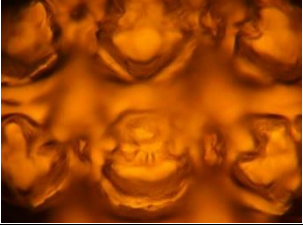
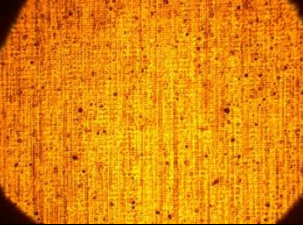
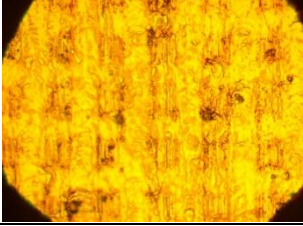
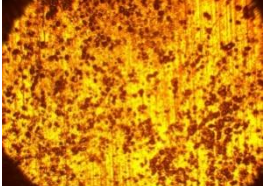
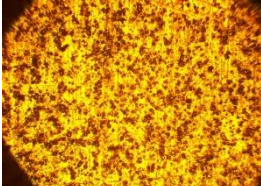
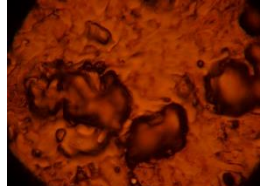
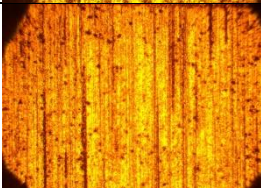
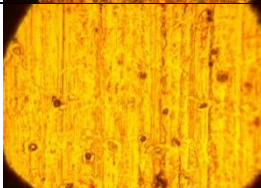
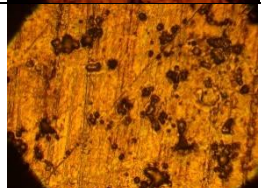
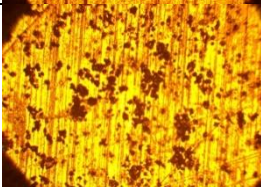
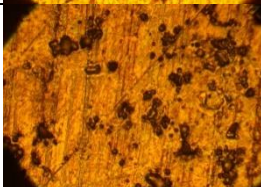
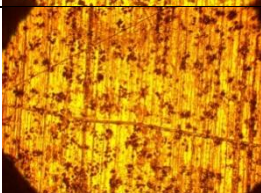
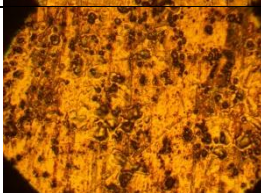
№	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×250		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×650		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×1250	
3						
4						
5						
6						

Таблица 4.6.3 – Морфология поверхности пластин из Р6М5 после лазерной абляции в водной среде.

№	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×250		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×650		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×1250	
1						

№	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×250		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×650		Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×1250	
2						
3						
4						
5						



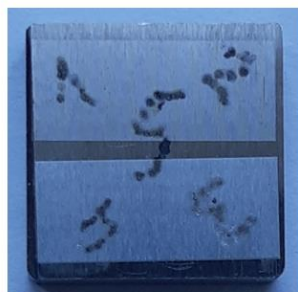
а)



б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.6.2 – Режущие пластины после лазерной абляции материал Р6М5. а – без обработки, б-д – при различных режимах абляции

Для окончательной оценки эксплуатационного потенциала разработанного метода в дальнейшей работе необходимо выполнить экспериментальные испытания, направленные на определение периода стойкости инструмента с модифицированной поверхностью, а также на оценку качества поверхностного слоя деталей, обработанных этим инструментом.

4.7 Анализ изменения химического состава на поверхности режущих пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава при облучении лазерными импульсами наносекундной длительности

Как было показано ранее, метод лазерной абляции является хорошо контролируемым и перспективным технологическим процессом, имеющим практическое значение для целенаправленного формирования наноструктур на обрабатываемой поверхности [75]. Экспериментальные исследования подтвердили, что обработка методом лазерной абляции приводит к упрочнению сплава Р6М5 в различных технологических средах [123]. Однако физико-химические механизмы, лежащие в основе этого упрочнения, требуют дополнительного изучения.

Поглощение лазерного излучения поверхностным слоем материала приводит к его быстрому локальному разогреву до высоких температур, достигающих величин, достаточных для плавления и испарения [4]. После прекращения импульса нагретый участок охлаждается с высокой скоростью, что обусловлено, главным образом, интенсивным теплопереносом во внутренние, холодные слои материала (теплоотвод) и, в меньшей степени, теплоотдачей с поверхности в окружающую среду. Важной особенностью процесса является кратковременность как фазы нагрева, так и фазы охлаждения, при этом практически отсутствует стадия выдержки при максимальной температуре.

Высокие скорости нагрева и охлаждения при лазерной обработке оказывают определяющее влияние на кинетику фазовых превращений и процессы

кристаллизации в расплавленной зоне [8]. При достижении определённой пороговой плотности мощности излучения начинается интенсивное испарение атомов с поверхности, причём скорость испарения различных элементов сплава различна из-за различий в их давлении пара и энергии связи [4]. Соответственно, процессы испарения неизбежно должны сопровождаться перераспределением, как химических связей, так и образованием новых с участием молекул газов, или воды, присутствующих у поверхности материалов.

Процесс лазерной абляции поверхности образцов проводился в трех вариантах: на воздухе, в воде и в инертной атмосфере азота. Эксперименты были проведены на установке «Fmark-100 NS» с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.1.1), работающей в импульсно-периодическом режиме. Режим обработки лазерным излучением образцов из материалов Р6М5 и Т15К6 представлены в таблице 4.7.1.

Таблица 4.7.1 – Режим обработки образцов лазерным излучением

№	Материал	Мощность, Вт	Частота, кГц	Импульс, нс	Скорость обработки, мм/с	Среда обработки
1	Р6М5	15	100	10	200	Воздух
2	Р6М5	15	100	10	200	Вода
3	Р6М5	15	100	10	200	Азот
4	Т15К6	15	100	10	200	Воздух
5	Т15К6	15	100	10	200	Вода
6	Т15К6	15	100	10	200	Азот

Металлографическое исследование режущих пластин после обработки выполнялось с использованием микроскопа 4ХВ при увеличениях $\times 250$, $\times 650$ и $\times 1250$. Полученные результаты представлены в таблице 4.7.2.

Для проведения сравнительного анализа влияния лазерного излучения на структуру были выбраны два инструментальных материала: быстрорежущая сталь Р6М5 (ГОСТ 19265) и твердый сплав Т15К6 (ГОСТ 3882) [52, 67]. Элементный

состав приповерхностного слоя исследовался методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на спектрометре Clever C-31.

Результаты РФА-исследования показали, что лазерная абляция, проведённая в водной среде, приводит к относительно равномерному испарению материала и не вызывает существенных изменений элементного состава поверхности образцов (таблицы 4.7.3, 4.7.4). В то же время, обработка в атмосфере воздуха или азота способствует не только перераспределению химических связей, но и приводит к изменению элементного состава поверхностного слоя. Это обусловлено процессами активного взаимодействия расплава с окружающей газовой средой, приводящими к замещению атомов углерода в карбидной фазе атомами кислорода или азота.

Таблица 4.7.2 – Морфология поверхности пластин из T15K6 после лазерной абляции.

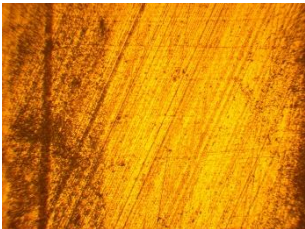
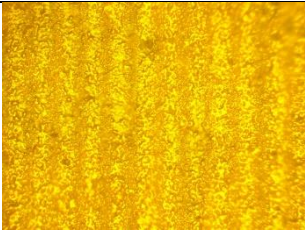
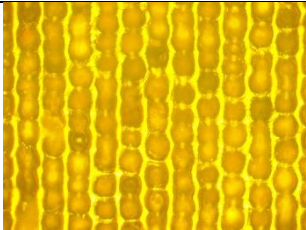
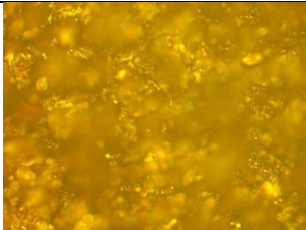
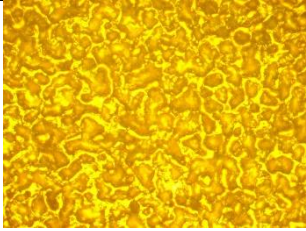
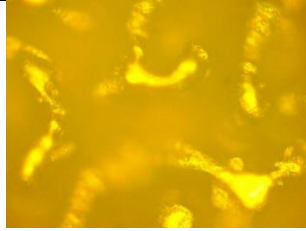
Среда	Поверхность под 250-кратным увеличением	Поверхность под 650-кратным увеличением	Поверхность под 1250-кратным увеличением
Необработанная поверхность			
Воздух			
Вода			

Таблица 4.7.3 – Химический состав образцов сплава Р6М5 после лазерной абляции

Р6М5 (воздух)		Р6М5 (вода)		Р6М5 (азот)		Р6М5 (ГОСТ 19265)	
Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %
С	0,75	С	0,83	С	0,85	С	0,82-0,9
Si	0,38	Si	0,35	Si	0,35	Si	0,2-0,5
Ni	0,43	Ni	0,43	Ni	0,44	Ni	до 0,6
Cu	0,22	Cu	0,15	Cu	0,18	Cu	до 0,5
V	1,98	V	1,76	V	1,81	V	1,7-2,1
Cr	4,45	Cr	4,06	Cr	4,08	Cr	3,8-4,4
Mo	7,12	Mo	6,35	Mo	6,38	Mo	4,8-5,3
W	5,20	W	4,75	W	4,62	W	5,5-6,5
Fe	78,89	Fe	79,87	Fe	80,19	Fe	~ 80
Примеси	0,6	Примеси	1,4	Примеси	1,1	Примеси	~ 1,0
Сумма	100	Сумма	100	Сумма	100	Сумма	100

Таблица 4.7.4 – Химический состав образцов сплава Т15К6 после лазерной абляции

Т15К6 (воздух)		Т15К6 (вода)		Т15К6 (азот)		Т15К6 (ГОСТ 3882)	
Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %	Элемент	Сод., %
С	6,6	С	7,8	С	7,1	С	7,8
Co	6,07	Co	5,5	Co	6,02	Co	До 6
Ti	11,2	Ti	12,6	Ti	11,6	Ti	12,0
W	75,6	W	74,5	W	75,2	W	74,1
N + O	0,5	N + O	–	N + O	0,5	N + O	–
Сумма	99,97	Сумма	100,4	Сумма	100,41	Сумма	100,0

Известно, что высокая твёрдость карбидов металлов имеет обратную сторону – повышенную хрупкость и склонность к растрескиванию при ударных и циклических нагрузках. Напротив, оксиды и нитриды соответствующих металлов характеризуются большей ударной вязкостью и сохраняют высокую стойкость к абразивному изнашиванию при различных операциях механической обработки. Проведённый химический анализ однозначно свидетельствует о наличии прямой взаимосвязи между изменением элементного и фазового состава приповерхностного слоя образцов и наблюдаемым упрочнением сплавов.

При заданном режиме лазерного воздействия упрочнение образцов происходит во всех исследованных технологических средах, однако механизмы этого упрочнения различаются.

В водной среде упрочняющий эффект, вероятно, обусловлен в первую очередь уменьшением плотности дефектов кристаллической структуры материала в результате быстрого переплава и закалки (эффект лазерного гетерогенного отпуска), а также эффектом дисперсионного упрочнения за счёт частиц оксидов, образующихся в ограниченном количестве. Общий упрочняющий эффект в данном случае является умеренным.

При обработке в газовых средах (воздух, азот) упрочняющее воздействие является более значительным. Это связано с достижением более высоких температур в зоне воздействия, что интенсифицирует термическую активацию поверхности и приводит к двум основным процессам:

- 1) Образованию упрочняющих фаз – оксидов (в воздухе) или нитридов (в азоте) – в поверхностном слое.
- 2) Частичному замещению атомов углерода в карбидной фазе на атомы азота или кислорода, что модифицирует состав и свойства существующих карбидов.

Упрочнение в результате процесса абляции вызвано взаимодействием тех или иных соединений, входящих в состав изучаемых образцов, с окружающей средой, а именно воздухом или азотом. Следует отметить, что есть одно существенное отличие между сплавами: в Р6М5 компоненты находятся, почти исключительно, в виде металлов, а в состав Т15К6 входят карбиды титана и вольфрама, только кобальт в чистом виде.

Анализ термодинамических характеристик химических соединений, образование которых возможно в газовых средах при высоких температурах, позволяет сделать следующие выводы. Чистые металлы, входящие в состав исследуемых сплавов: железо (Fe), вольфрам (W) и молибден (Mo); склонны к образованию оксидов. В тоже время ванадий (V) и хром (Cr) проявляют большую склонность к образованию нитридов [58]. При этом молибден и вольфрам образуют

высшие оксиды MO_3 и WO_3 , а железо смесь оксидов (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) в соотношении, определяемом локальными термодинамическими условиями.

В результате лазерной абляции твердого сплава T15K6 в атмосфере воздуха происходит последовательное окисление кобальтовой связки с образованием оксидов: сначала Co_3O_4 , а при достижении более высоких локальных температур – CoO . Карбиды вольфрама (WC) и титана (TiC) в таких условиях частично трансформируются в оксиды (WO_3 , TiO_2) или, при наличии активного азота в среде, в нитриды (WN , TiN). В атмосфере чистого азота основным направлением процесса является нитридообразование.

Поскольку время воздействия лазерного импульса составляет единицы – сотни наносекунд, процессы химического взаимодействия, как правило, не достигают термодинамического равновесия и завершаются в условиях высоких скоростей охлаждения. Тем не менее, даже такая неравновесная модификация поверхностного слоя приводит к существенному повышению прочности и твердости образцов твердосплавных материалов без значительного изменения их геометрических размеров [1].

Таким образом, анализ изменения химического и фазового состава поверхности исследуемых сплавов P6M5 и T15K6 позволяет установить определяющее влияние состава и активности окружающей технологической среды на механизм лазерной абляции. В воздухе доминируют процессы окисления компонентов сплава, в азоте – нитридообразования, а в водной среде происходит подавление интенсивных газофазных реакций с формированием упрочнённого слоя, преимущественно за счёт структурных превращений. Установленная зависимость между средой, формирующимся составом поверхности и эксплуатационными свойствами (износостойкостью, твердостью) является основой для целенаправленного выбора технологических параметров лазерной обработки инструментальных материалов для достижения заданных функциональных характеристик.

Исследования в данной области обладают несомненной практической ценностью.

4.8 Исследование гидрофобности поверхностей режущих инструментов при модификации поверхностного слоя лазерными импульсами наносекундной длительности

Как было установлено ранее, при лазерной абляции твердых тел в технологической среде при плотности энергии, превышающей порог плавления материала, происходит генерация наночастиц, а на поверхности формируются наноструктуры.

Создание гидрофобных структур на поверхности режущего инструмента является перспективным способом снижения адгезионной составляющей трения [90, 96, 99, 103, 102, 111, 122, 121]. В природе аналогичный эффект наблюдается на листьях лотоса (рисунок 4.8.1), где микро- и наноструктуры обеспечивают водоотталкивающие свойства.

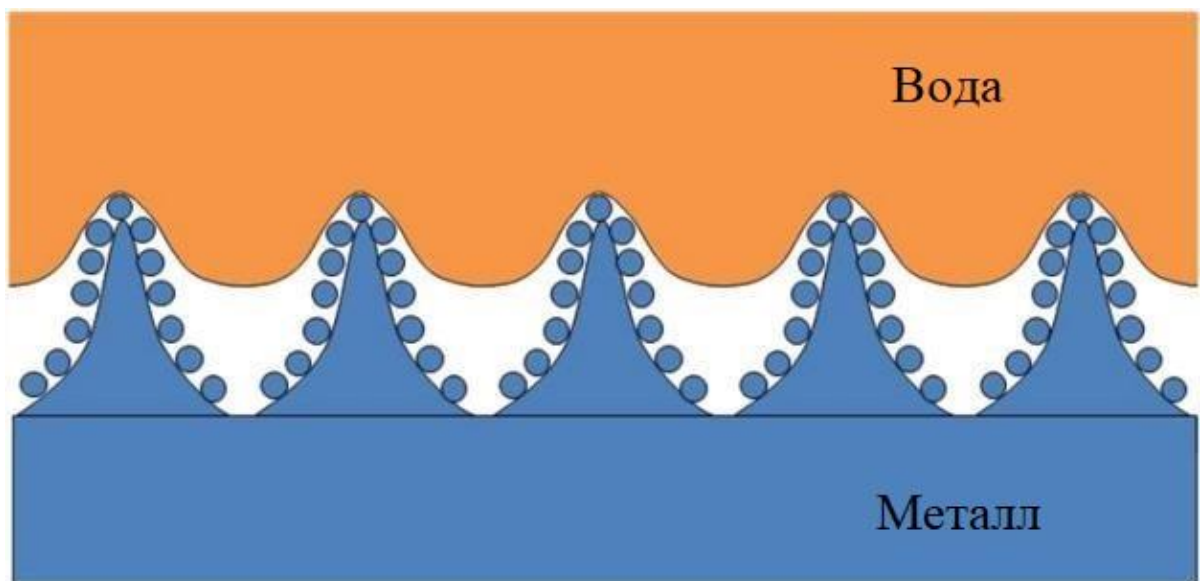


Рисунок 4.8.1 – Схема взаимодействия между водой и двойной шероховатостью поверхности металла после импульсной лазерной абляции [111]

В данной работе гидрофобная поверхность формируется на инструменте с помощью лазерной абляции. Лазерная обработка создает структуры двойной шероховатости, подобно листу лотоса: микрорельеф в виде шипов с наложенными наноструктурами [90]. Такая архитектура обеспечивает воздушные карманы,

которые уменьшают контакт капли жидкости с поверхностью.

По сравнению с химическими методами [102] лазерное модифицирование позволяет создавать более устойчивые гидрофобные структуры, сохраняя механическую прочность поверхности инструмента.

Экспериментальные исследования модифицирования поверхности режущих пластин методом лазерной абляции на воздухе и в жидкости были проведены на экспериментальной установке МиниМаркер 2-20А4 с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.2.1). Максимальная энергия в импульсе – 1 мДж, рабочая длина волны излучения – 1,064 мкм, максимальная мощность – 20 Вт, длительность импульсов – 4–200 нс, частота импульса в экспериментах – 100 кГц.

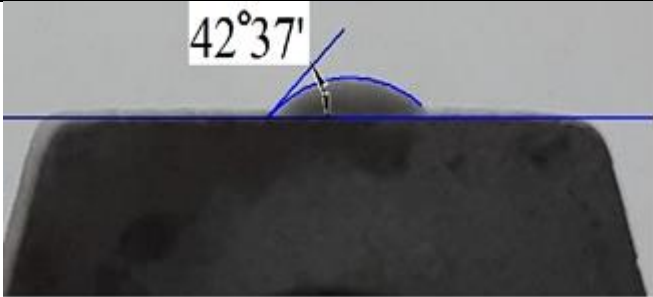
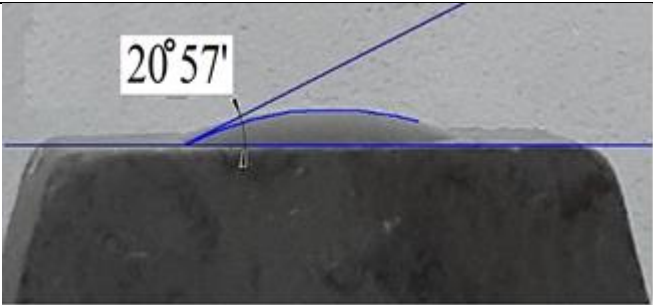
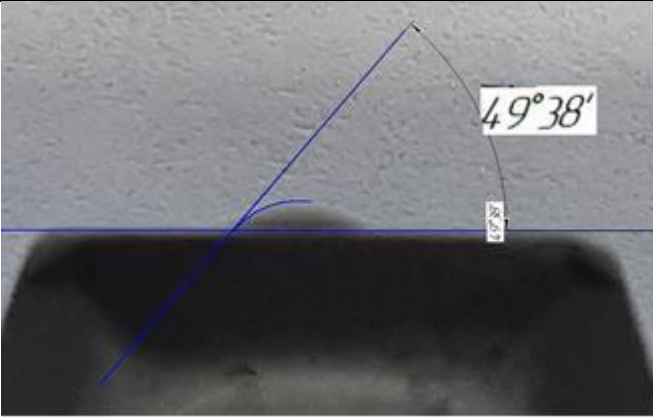
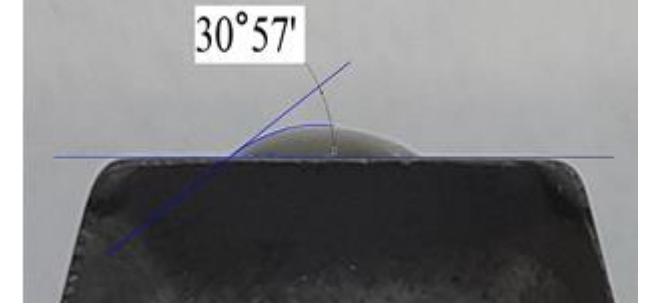
Оптимальные режимы лазерной абляции пластин токарных резцов в водной среде, подобранные в ходе экспериментальных исследований, сведены в таблицу 4.8.1.

Таблица 4.8.1 – Режимы лазерной абляции пластин токарных резцов в водной среде

№	Материал пластины	Мощность импульса <i>P, Вт</i>	Скорость обработки <i>V, мм/с</i>	Длительность импульсов, <i>нс</i>	Схема сканирования
1	ВК8	52	800	10	Двойное перекрестное
2	Р6М6	5	800	10	Двойное перекрестное

Полученные модифицированные поверхности были исследованы на смачиваемость водой и индустриальным маслом И30. Результаты экспериментов представлены в таблице 4.8.2 и 4.8.3.

Таблица 4.8.2 – Смачиваемость поверхности пластин до и после абляции, материал экспериментальных пластин ВК8

№	Материал пластины и вид обработки	Поверхность пластин после лазерной абляции	Вид жидкости	Угол смачиваемости
1	ВК8 Необработанный	 A photograph showing a dark, rectangular plate with a horizontal line of water. A blue line is drawn tangent to the water's surface, and a black arc indicates the contact angle, labeled 42°37'.	вода	42°37'
2		 A photograph showing a dark, rectangular plate with a horizontal line of oil. A blue line is drawn tangent to the oil's surface, and a black arc indicates the contact angle, labeled 20°57'.	масло И30	20°57'
3	ВК8 абляция в жидкости	 A photograph showing a dark, rectangular plate with a horizontal line of water. A blue line is drawn tangent to the water's surface, and a black arc indicates the contact angle, labeled 49°38'.	вода	49°38'
4		 A photograph showing a dark, rectangular plate with a horizontal line of oil. A blue line is drawn tangent to the oil's surface, and a black arc indicates the contact angle, labeled 30°57'.	масло И30	30°57'

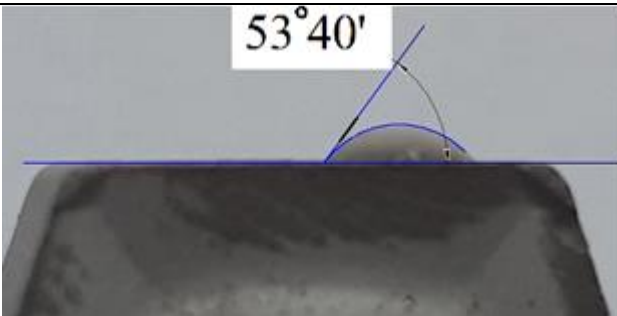
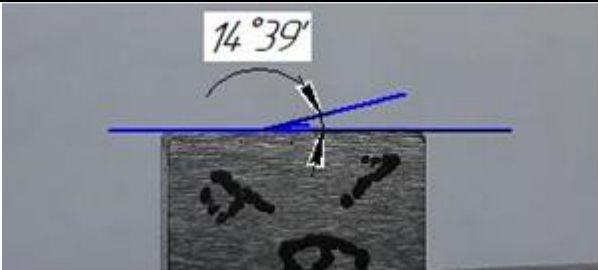
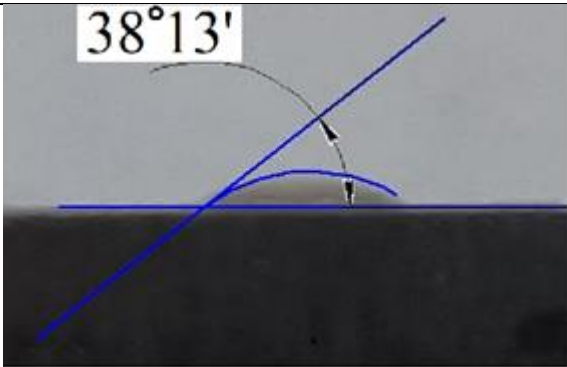
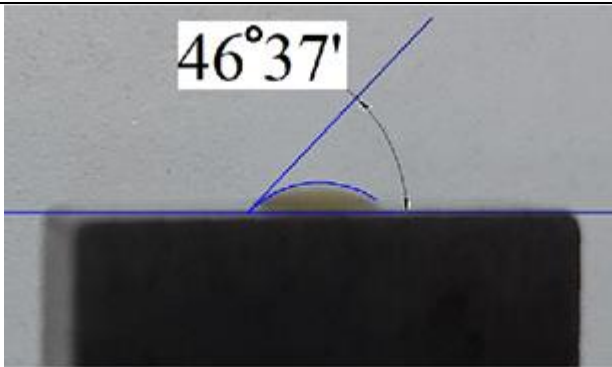
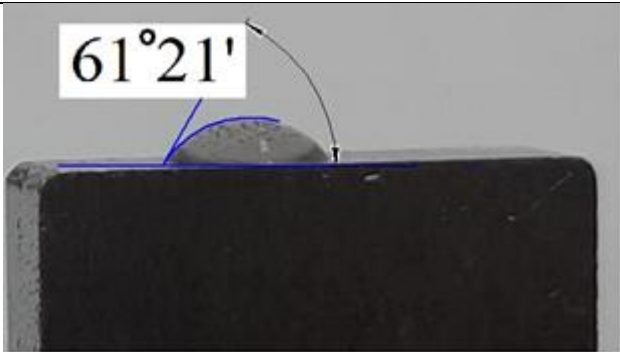
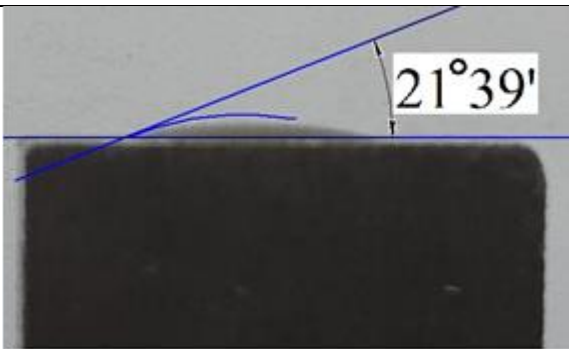
№	Материал пластины и вид обработки	Поверхность пластин после лазерной абляции	Вид жидкости	Угол смачиваемости
5	ВК8 Абляция на воздухе		вода	53°40'
6			масло И30	18°50'

Таблица 4.8.3 – Смачиваемость поверхности пластин до и после абляции, материал экспериментальных пластин Р6М5

№	Материал пластины и вид обработки	Поверхность пластин после лазерной абляции	Вид жидкости	Угол смачиваемости
1	Р6М5 Необработанный		вода	21°52'
2			масло И30	14°39'

№	Материал пластины и вид обработки	Поверхность пластин после лазерной абляции	Вид жидкости	Угол смачиваемости
3	Р6М5 Абляция в жидкости		вода	38°13'
4			масло ИЗО	46°37'
5	Р6М5 Абляция на воздухе		вода	61°21'
6			масло ИЗО	21°39'

На рисунках 4.8.2 и 4.8.3 представлены диаграммы, характеризующие изменение краевого угла смачивания поверхности пластин инструментальных

сплавов ВК8 и Р6М5 после их обработки импульсной лазерной абляцией.

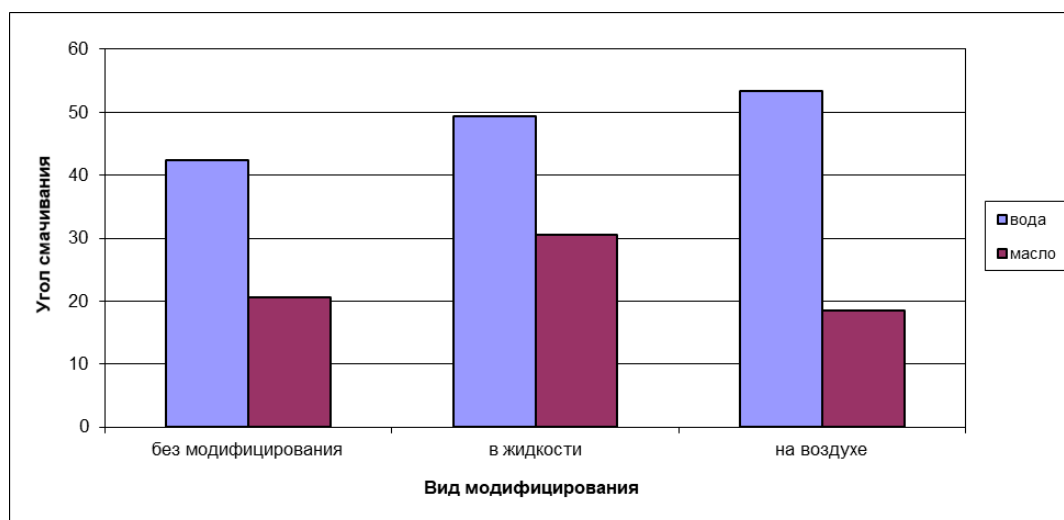


Рисунок 4.8.2 – Зависимость краевого угла смачивания поверхности пластин ВК8 от режима лазерной абляции

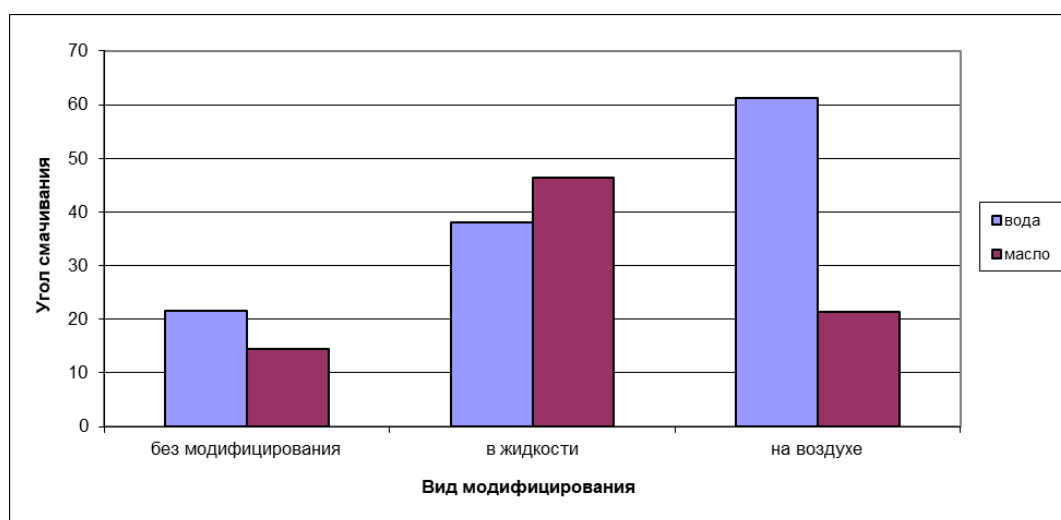


Рисунок 4.8.3 – Зависимость краевого угла смачивания поверхности пластин Р6М5 от режима лазерной абляции

Экспериментальные исследования демонстрируют существенное увеличение гидрофобных характеристик инструментальных материалов после импульсной лазерной абляции. Наблюдается существенное увеличение углов смачивания:

1) Для сплава ВК8 при абляции в воде следующие изменения угла смачивания: +16% для воды, +48% для масла И30.

При абляции на воздухе: +26% для воды, -10% для масла ИЗО.

2) Для быстрорежущей стали Р6М5 при абляции в воде: +77% для воды, +222% для масла ИЗО

При абляции на воздухе: +184% для воды, +48,6% для масла ИЗО

Полученные данные свидетельствуют о формировании устойчивых гидрофобных свойств на поверхности инструментальных материалов после лазерной обработки. Особенно существенный эффект наблюдается для быстрорежущей стали Р6М5, где углы смачивания увеличиваются в несколько раз.

Однако некоторые данные показали, что определенные параметры лазерной обработки приводят к уменьшению углов смачивания, повышая гидрофильность поверхности. Например, для пластин ВК8, снизился на 10%. Это связано с изменением микрорельефа и химического состава поверхностного слоя.

Полученные гидрофильные поверхности обладают улучшенной адгезией, что делает их перспективными для последующего нанесения диффузионных покрытий. Повышение смачиваемости способствует более равномерному распределению покрытия и образованию прочных связей на границе раздела.

Выявленный эффект открывает новые возможности для оптимизации технологического процесса. Режимы лазерной обработки, обеспечивающие гидрофильные свойства, могут быть использованы в качестве подготовительного этапа перед диффузионным насыщением, повышая качество и долговечность инструментальных покрытий.

4.9 Экспериментальные исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава Т15К6

Как было установлено ранее лазерная обработка быстрорежущих сталей и титановых сплавов с генерацией твердых частиц в газовой среде обеспечивает существенное повышение твердости поверхности (до 50% поданным [94]) за счет

совместного эффекта газонасыщения и дисперсионного упрочнения, однако введенные частицы могут являться источником локальных микронапряжений из-за различий коэффициентов термического расширения с матрицей сплава. Это обуславливает необходимость оптимизации параметров лазерного воздействия для минимизации дефектообразования при сохранении достигнутого упрочняющего эффекта.

Целью настоящего раздела является экспериментальное исследование характера изменения морфологии, микроструктуры и локального химического состава поверхности режущего инструмента при его облучении лазерными импульсами наносекундной длительности в различных технологических средах.

Экспериментальные исследования проводились на установке Fmark-100 NS (рисунок 4.9.1). Объекты исследования четырехгранная пластина из инструментального материала Р6М6 и пятигранная сменная пластина из материала Т15К6.

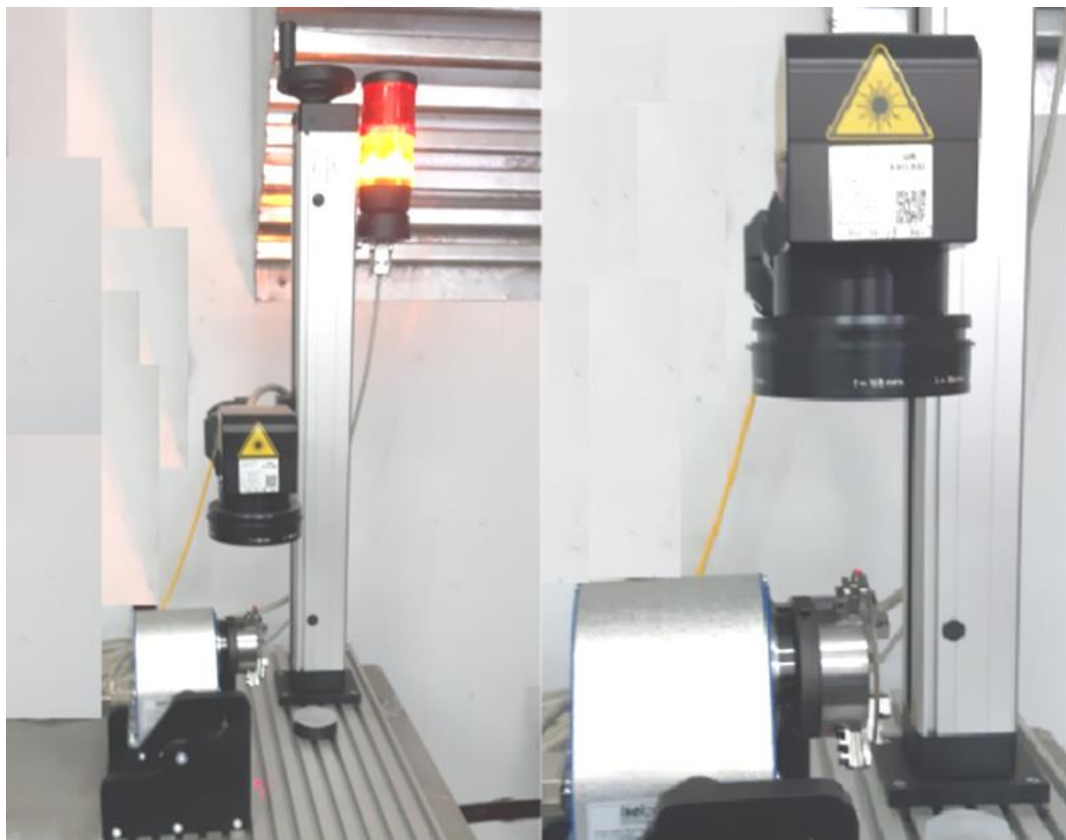


Рисунок 4.9.1 – Экспериментальная установка на основе волоконного иттербиевого лазера «Fmark-100 NS»

Режимы лазерной абляции пластин были составлены на основе результатов ранее проведённых исследований и представлены в таблицах 4.9.1 (для Р6М5) и 4.9.2 (для Т15К6). Ключевыми варьируемыми параметрами являлись: мощность и частота следования импульсов.

Таблица 4.9.1 – Режимы лазерной абляции пластин Р6М5

№	Материал пластины	Мощность импульса <i>P, Вт</i>	Скорость обработки <i>V, мм/с</i>	Длительность импульсов, <i>нс</i>	Шаг абляции <i>лин/мм</i>	Частота импульса <i>кГц</i>
1	Р6М5	8	100	4	40	40
2	Р6М5	10	100	4	40	40

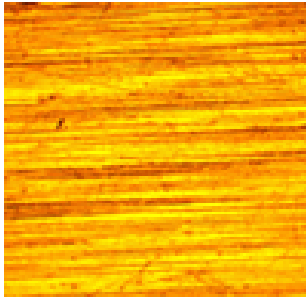
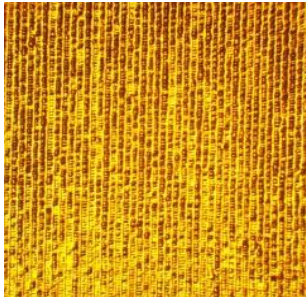
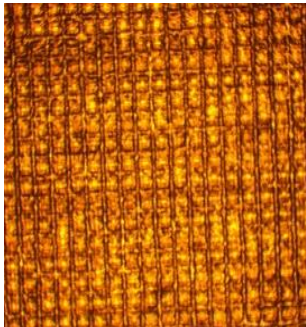
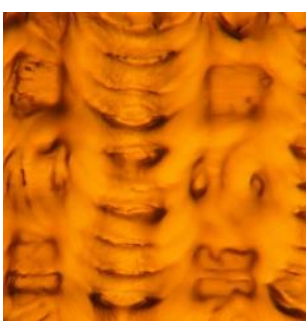
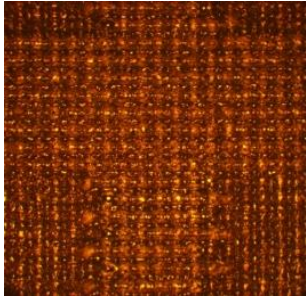
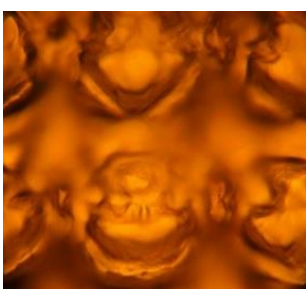
Таблица 4.9.2 – Режимы лазерной абляции пластин из Т15К6

№	Материал пластины	Мощность импульса <i>P, Вт</i>	Скорость обработки <i>V, мм/с</i>	Длительность импульсов, <i>нс</i>	Шаг абляции <i>лин/мм</i>	Частота импульса <i>кГц</i>
1	Т15К6	10	100	4	40	100
2	Т15К6	10	100	4	40	60

Следует отметить, что обработка проводилась методом параллельного (непересекающегося) сканирования, при котором траектории соседних проходов луча не пересекались, что обеспечивало формирование регулярной ячеистой структуры.

Первичный анализ морфологии обработанных лазером поверхностей и их микрофотографирование проводились с использованием металлографического микроскопа модели «4ХВ» при увеличениях $\times 250$ и $\times 1250$. Полученные оптические микрофотографии представлены в таблице 4.9.3.

Таблица 4.9.3 – Морфология поверхности металлорежущей пластины Р6М5 после лазерной абляции

№ п/п	Мощность излучения, <i>Вт</i>	Морфология поверхности при увеличении $\times 250$	Морфология поверхности при увеличении $\times 1250$
Без обработки			
1	5		
2	10		
3	15		

Для детального исследования микроструктуры был применён метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на установке TESCAN MIRA3. На рисунках 4.9.2 – 4.9.5 представлены СЭМ-микрофотографии, иллюстрирующие

три качественно различных типа морфологии обработанной поверхности (вид сверху), полученные при различном увеличении.

На приведенных рисунках были выявлены характерные морфологии поверхностей. Наблюдаются зоны, характерные для переплавления и быстрой кристаллизации, области селективного испарения компонентов.

На рисунке 4.9.8 представлен спектр химического состава исходного (немодифицированного) сплава Р6М5, который соответствует химическому составу материала данной марки [52]. Данные по химическому составу основных компонентов сплава, а также ряда примесей, сведены в таблицу (таблица 4.9.4). Следует отметить, что спектры и, соответственно, показатели химического состава поверхностного слоя, показанные на рисунках 4.9.10 и 4.9.11, практически идентичны. Низкая вариативность в данных зонах связана с опосредованным термическим воздействием лазерного излучения на указанные участки поверхности материала.

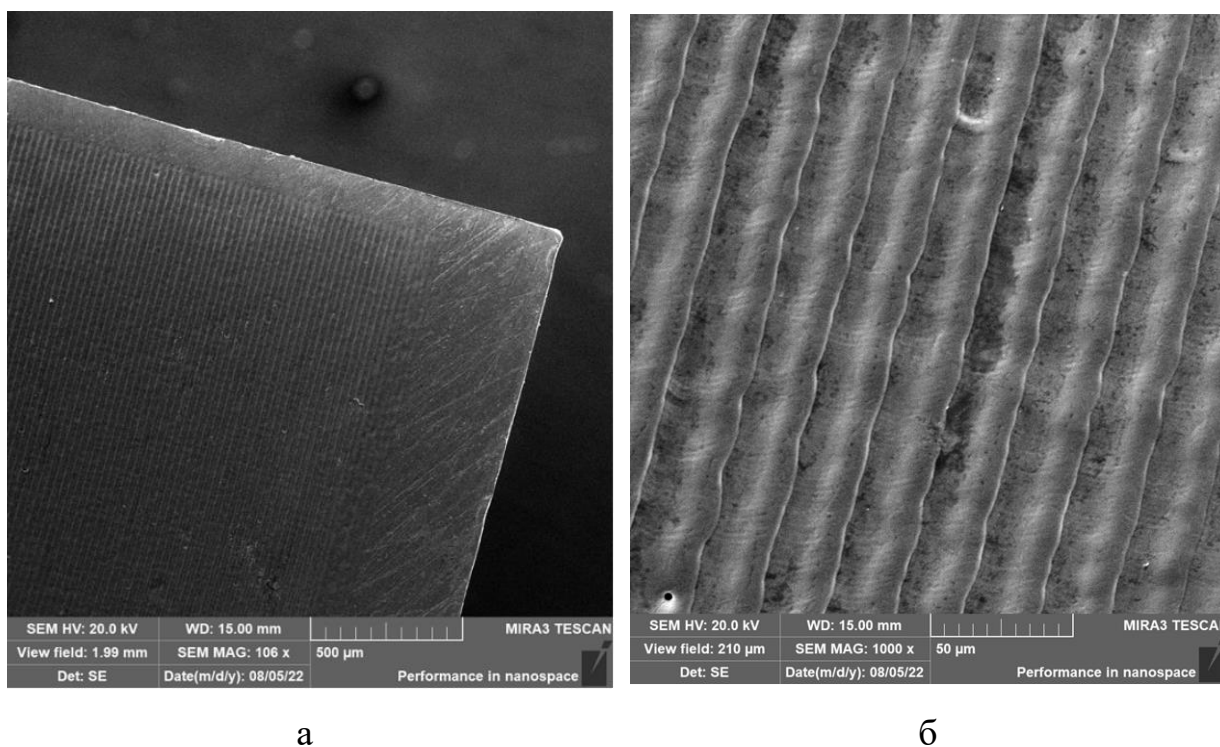
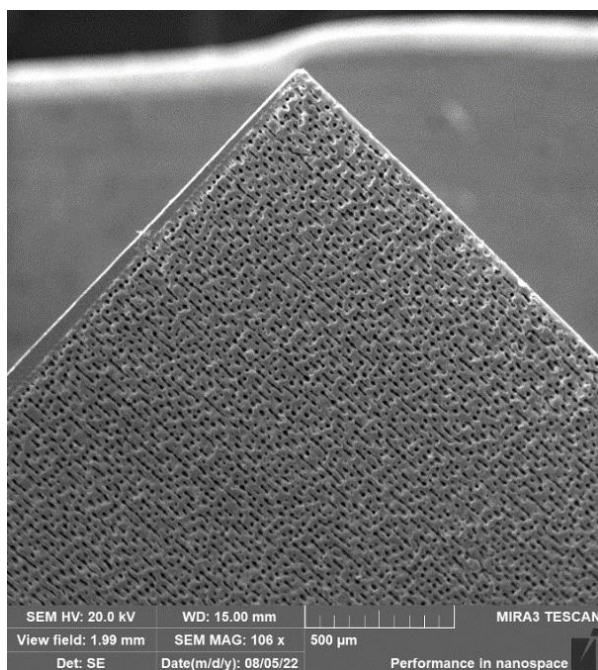
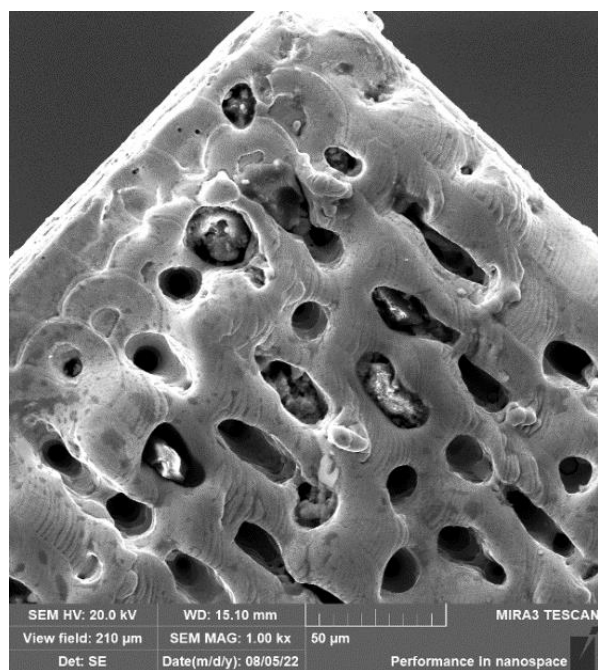


Рисунок 4.9.2 – Морфология поверхности режущего инструмента Р6М5 после абляции на воздухе при увеличении: а – $\times 106$, б – $\times 1000$

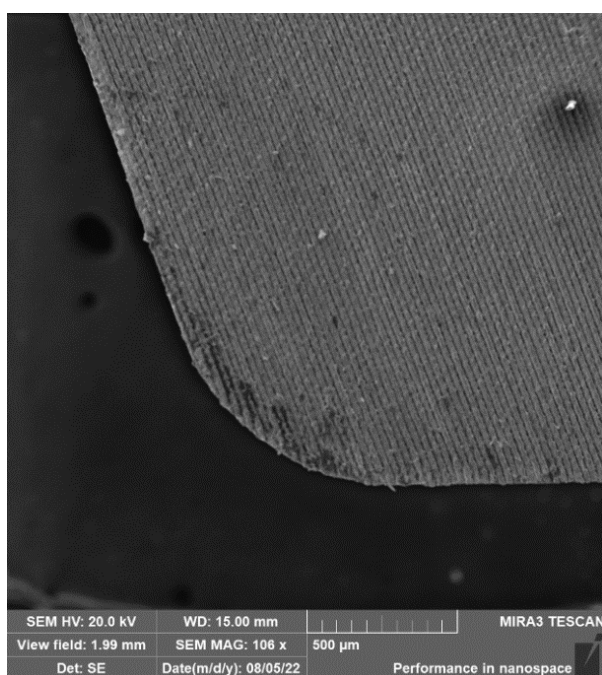


а

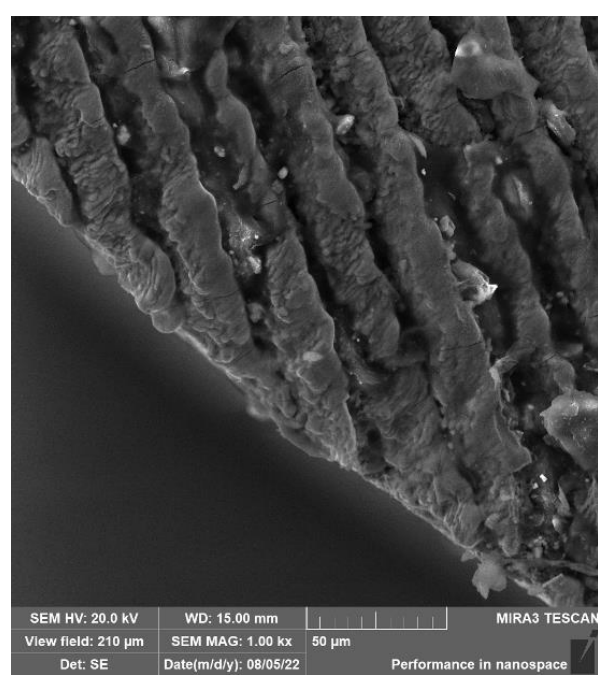


б

Рисунок 4.9.3 – Морфология поверхности режущего инструмента Р6М5 после абляции в воде при увеличении: а – $\times 106$, б – $\times 1000$

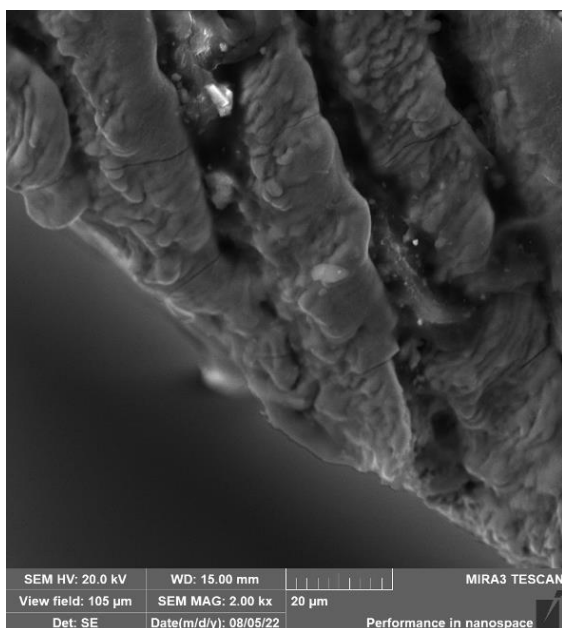


а

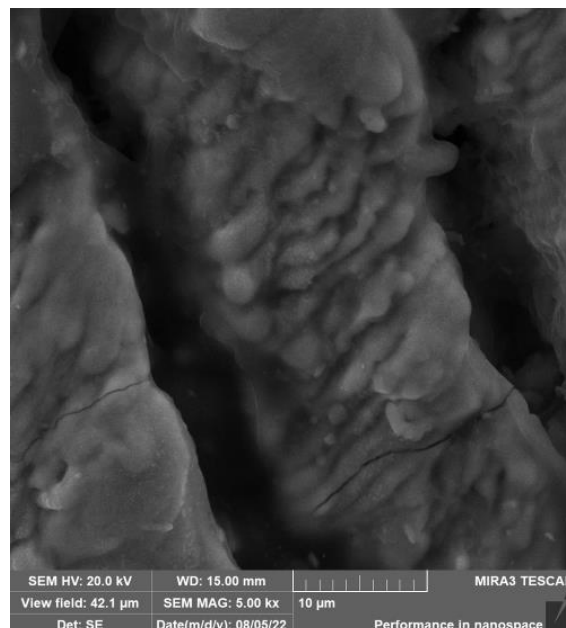


б

Рисунок 4.9.4 – Морфология поверхности режущего инструмента Т15К6 после абляции на воздухе при увеличении: а – $\times 106$, б – $\times 1000$



а



б

Рисунок 4.9.5 – Двойные структуры на поверхности режущего инструмента Т15К6 при увеличении: а – $\times 2000$, б – $\times 5000$

На рисунках 4.9.6 и 4.9.7 показаны участки поверхности, химический состав которых был проанализирован методом спектрального анализа. Результаты проведенных анализов приведены на спектрах химического состава поверхности (рисунки 4.9.8–4.9.11) сведены в таблицу 4.9.4.

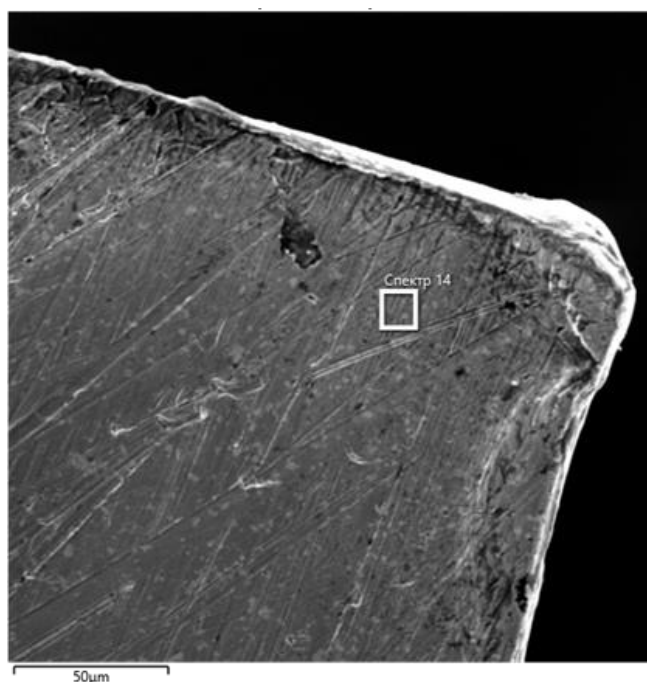


Рисунок 4.9.6 – Участок необработанной пластины из стали Р6М5

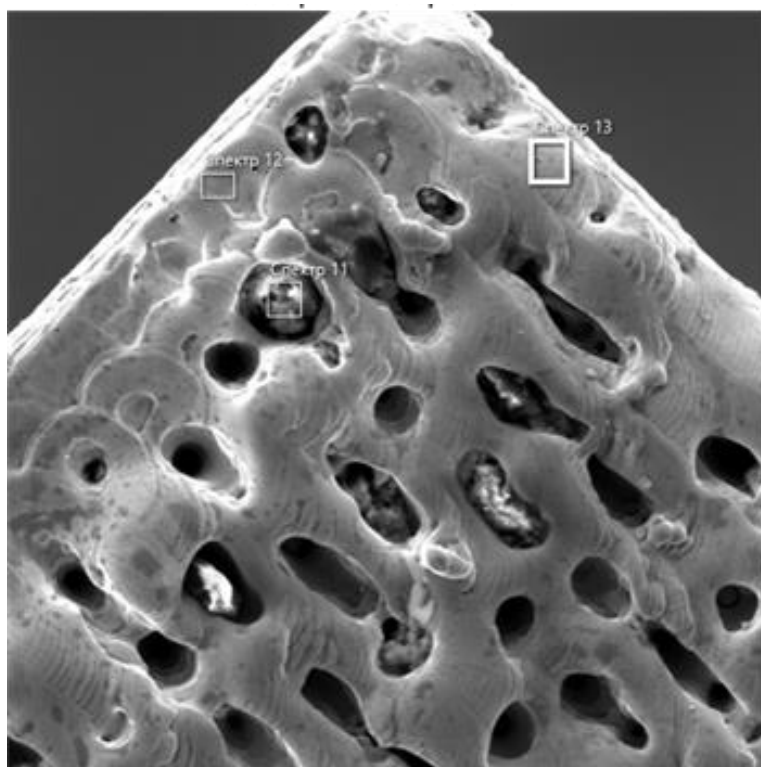


Рисунок 4.9.7 – Участок пластины стали Р6М5, обработанной с увеличением
×1000

Таблица 4.9.4 – Химический состав некоторых участков поверхностного слоя сплава Р6М5

Метка спектра	Спектр 11	Спектр 12	Спектр 13	Спектр 14
C	26.69	4.82	5.31	7.33
O	11.38	2.67	—	0.79
Al	0.44	0.08	0.12	—
Si	0.31	0.23	0.40	0.48
Cl	0.39	0.03	0.01	—
K	0.74	0.00	0.02	0.20
Co	6.00	0.00	0.00	0.57
V	0.92	2.15	1.83	1.68
Cr	2.60	4.31	3.95	4.07
Fe	48.04	73.66	76.72	74.40
Mo	1.35	5.15	4.89	4.43
W	1.13	6.89	6.76	6.07
Всего	100.00	100.00	100.00	100.00

Данные спектрального анализа (см. рисунок 4.9.8–4.9.11 и таб. 4.9.4) показали, что эффект максимального упрочнения достигается в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения на поверхность материала. Повышение содержания углерода в 4 раза и более и кислорода на порядок отражает значительное упрочнение поверхности сплава. Кроме того, на рисунках 4.9.2 и 4.9.3 явно видно изменение морфологии поверхности образца. Образование характерных «волн» также приводит к лучшему распределению смазочно-охлаждающих жидкостей на поверхности сплава, к увеличению площади поверхностного слоя, что также ведет к равномерному распределению тепла и, следовательно, к повышению теплостойкости материала.

Проведенные эксперименты подтвердили изменения химического состава поверхностного слоя материала в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения. Изменение морфологии поверхностного слоя режущих пластин привело к образованию наноструктур с двойной шероховатостью. Результаты проведенного спектрального анализа некоторых участков поверхностного слоя экспериментальных образцов из сплава Р6М5 подтверждают теорию о получении новых функций вблизи главной режущей кромки с целью повышения износостойкости.

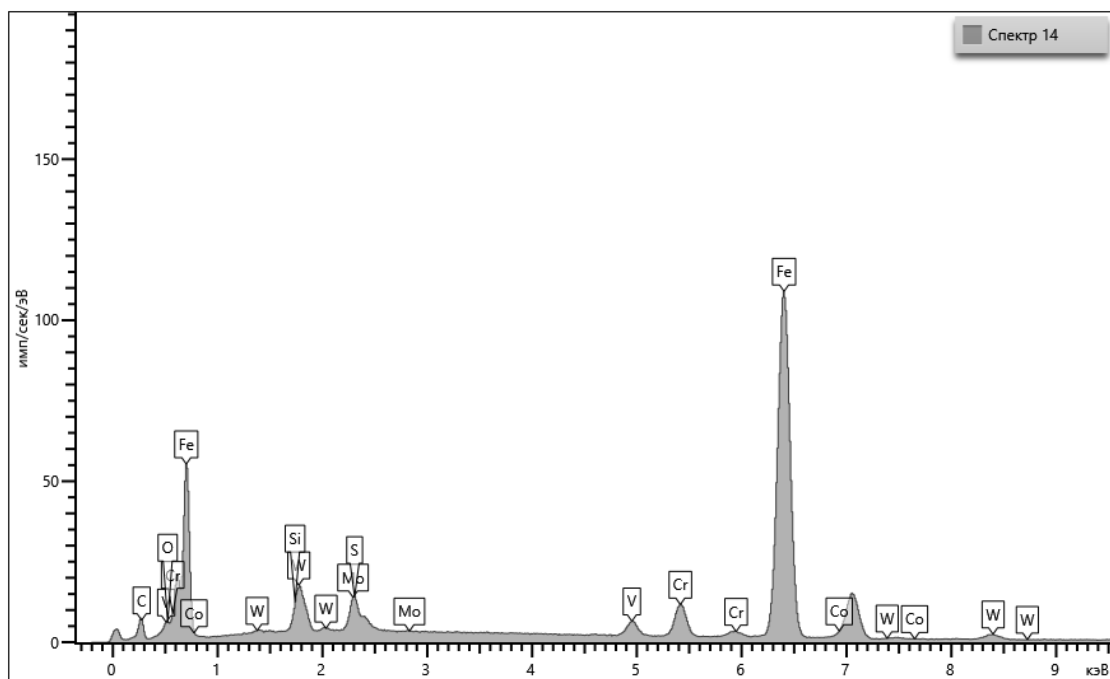


Рисунок 4.9.8 – Спектр участка 14 необработанной поверхности сплава Р6М5

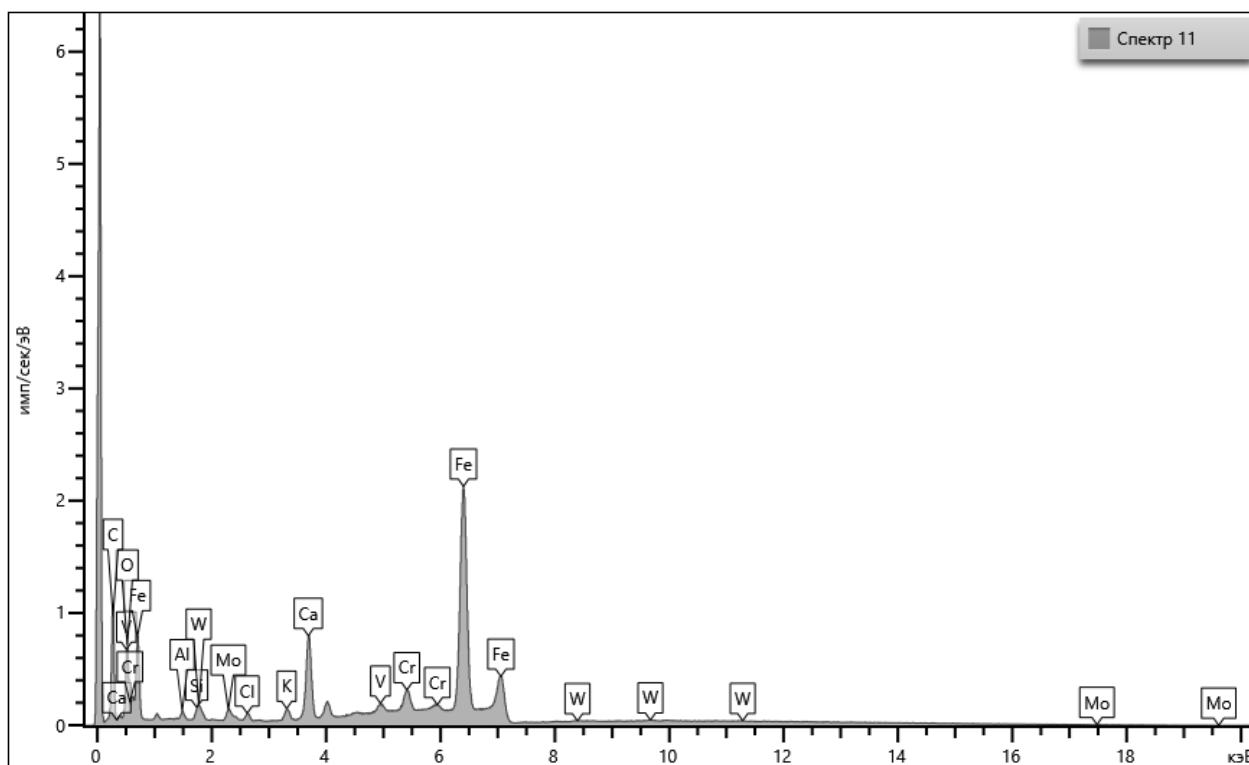


Рисунок 4.9.9 – Спектр участка 11 поверхности сплава Р6М5 в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения

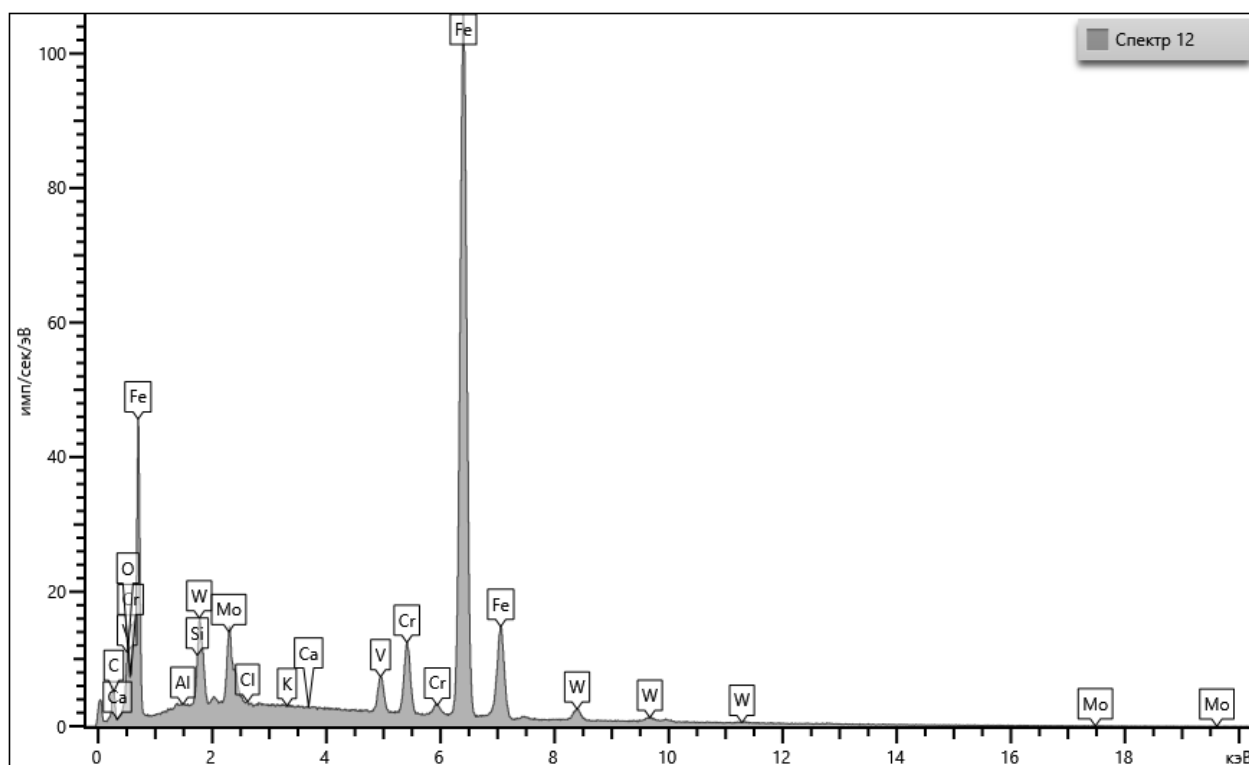


Рисунок 4.9.10 – Спектр участка 12 поверхности сплава Р6М5 в зоне термического воздействия лазерного излучения

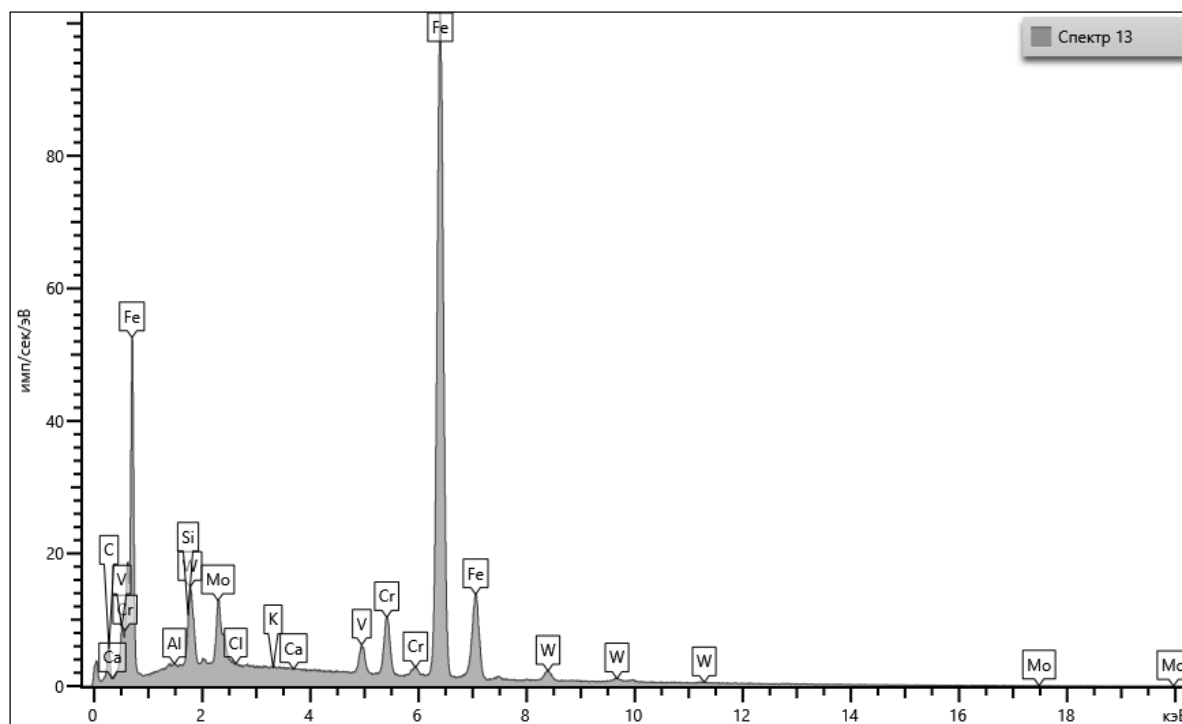


Рисунок 4.9.11 – Спектр участка 13 поверхности сплава Р6М5 в зоне термического воздействия лазерного излучения

На рисунках 4.9.12 показаны участки поверхности сплава Т15К6, химический состав которого был проанализирован методом спектрального анализа. Результаты проведенных анализов приведены на спектрах химического состава поверхности (рисунки 4.9.13–4.9.15) сведены в таблицу 4.9.5.

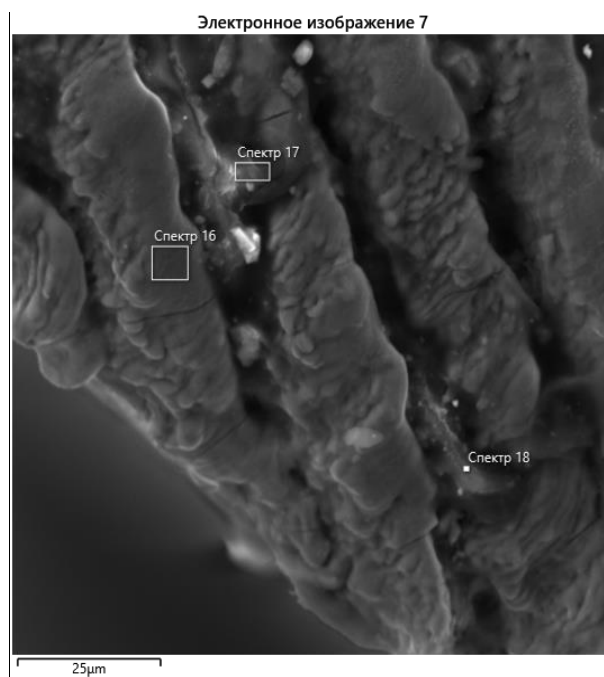


Рисунок 4.9.12 – Обработанная поверхность сплава Т15К6 с увеличением $\times 2000$

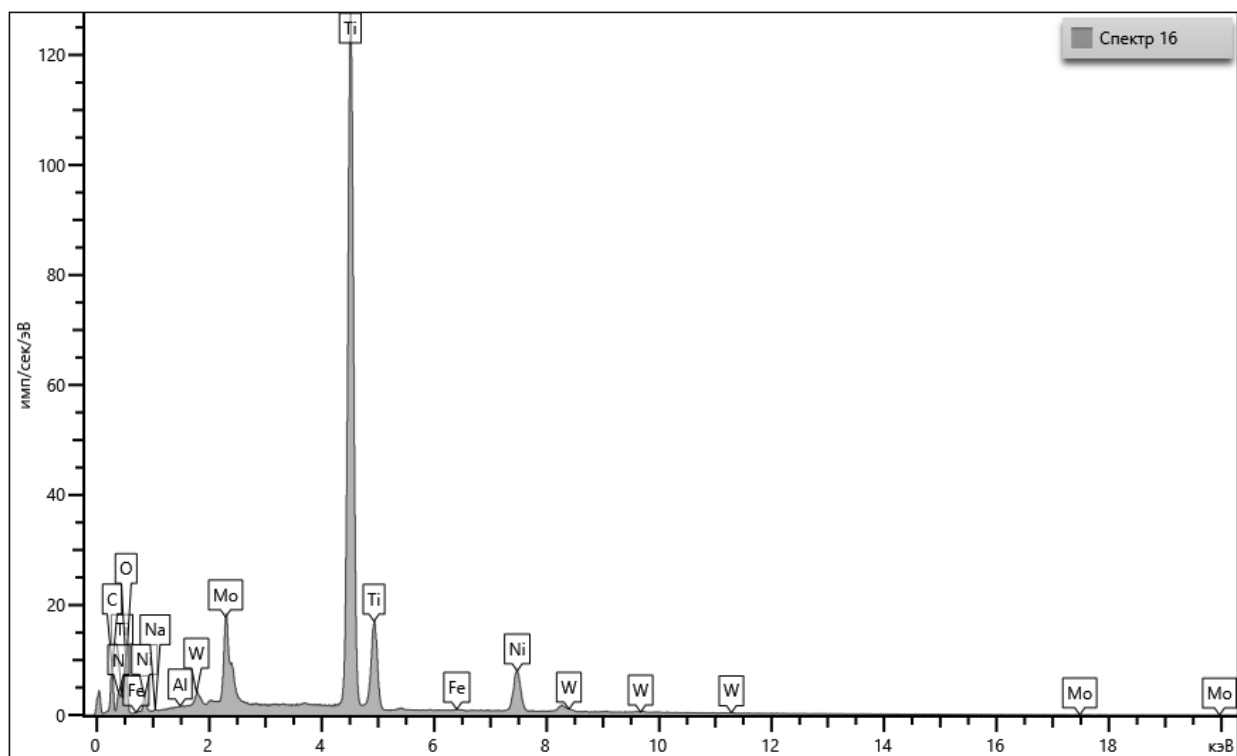


Рисунок 4.9.13 – Спектр участка 16 поверхности сплава Т15К6 в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения

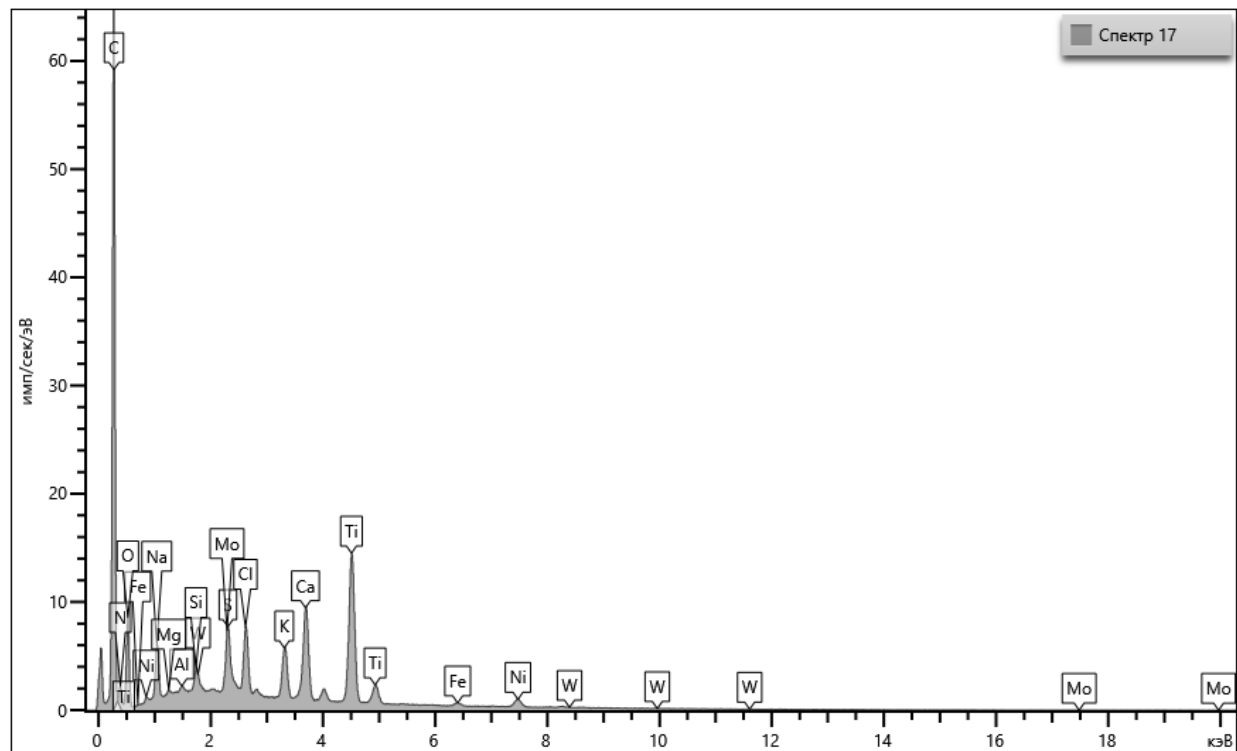


Рисунок 4.9.14 – Спектр участка 17 поверхности сплава Т15К6 в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения

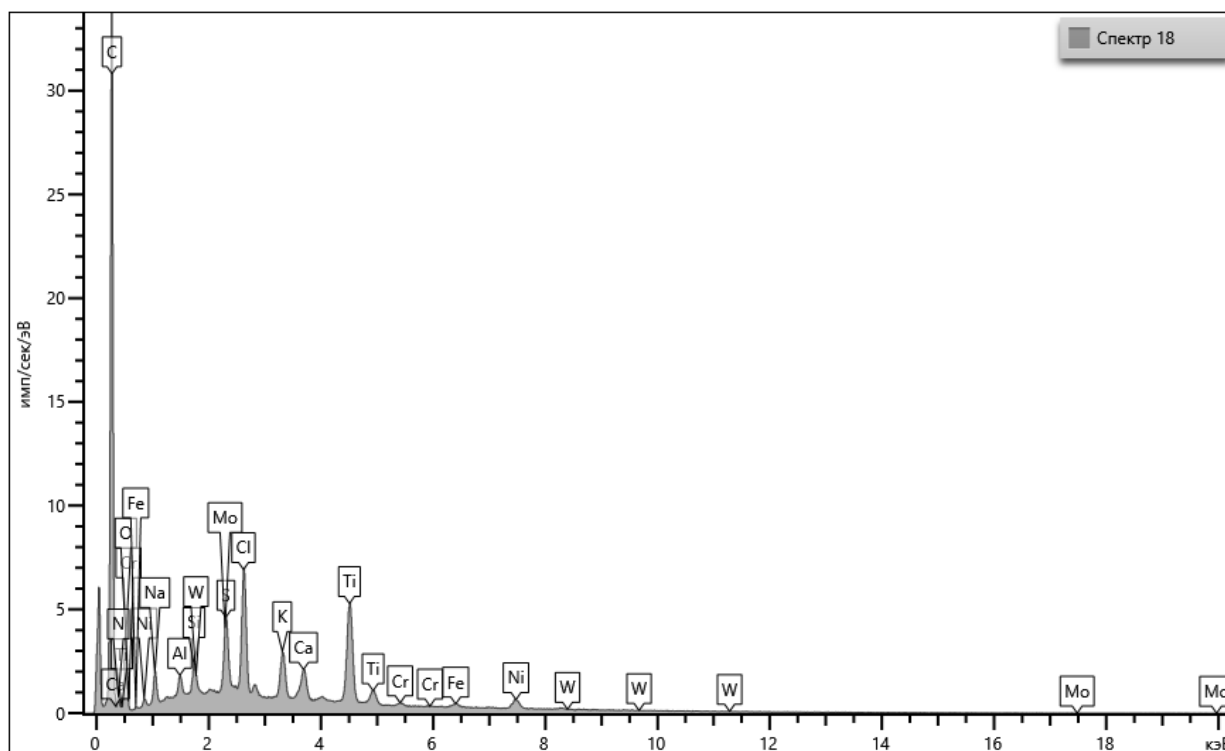


Рисунок 4.9.15 – Спектр участка 18 поверхности сплава Т15К6 в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения

Результаты спектрального анализа представлены в таблице 4.9.5.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что сильное изменение геометрии поверхностного слоя и образование наноструктур с сильным перераспределением химического состава сплава, приводит к росту твердости выступающих параллельных слоев.

Таблица 4.9.5 – Химический состав некоторых участков поверхностного слоя сплава Т15К6

Метка спектра	Спектр 16	Спектр 17	Спектр 18	Т15К6 (необработанный)
С	8,94	5,47	6,42	7,98
Н	0,46	8,07	4,94	0,38
О	14,18	14,70	11,91	1,2
Na	0,08	1,73	0,98	0,27
Mg	—	0,10	—	—
Al	0,03	0,12	0,42	0,35
Si	—	0,38	0,56	0,30
S	—	0,88	1,43	0,15

Метка спектра	Спектр 16	Спектр 17	Спектр 18	T15K6 (необработанный)
Cl	—	1,75	3,36	—
K	—	1,77	1,64	0,11
Ca	—	3,59	1,20	0,27
Ti	56,67	8,88	6,13	12,14
Cr	—	—	0,25	0,26
Fe	0,15	0,36	0,37	0,28
Co	9,58	1,32	1,55	6,07
W	9,90	50,87	58,82	70,24
Всего	100,00	100,00	100,00	100,00

Ранее было показано, что при нагревании сплава идет дополнительное растворение карбидов титана и вольфрама в кобальте [12]. Таким образом, происходит уменьшение размеров зерен WC, а также изменение их формы на более округлую. Кроме того, наблюдается рост микроискажений решетки. С ростом температуры наблюдается упрочнение сплава, сопровождающее ростом плотности дислокаций от величины около $1,47 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ до $5,71 \times 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$ и даже выше.

При быстром нагреве и быстром охлаждении карбида титана, которые сопровождаются воздействием лазерного излучения на поверхность исследуемого сплава, также происходят уменьшение зерен TiC и рост плотности дислокаций. Добавление в структуру сплава кислорода и азота приводит к образованию оксида и нитрида титана соответственно, что сопровождается линейным ростом величины твердости поверхности.

Воздействие лазерного излучения на поверхность сплава T15K6 методом непересекающегося воздействия приводит к изменению морфологии поверхности материала. В результате процесса лазерной абляции поверхность сплава приобретает двоякую выпукло-вогнутую структуру. Геометрическое изменение поверхности приводит к перераспределению структуры материала и сопровождается образованием оксида и нитрида титана, а также уменьшением величины зерен и увеличением плотности дислокаций. Сумма процессов, происходящих под воздействием лазерного излучения высокой интенсивности, приводит к росту твердости и прочности поверхности сплава T15K6.

При импульсной обработке характеристика получаемых структур на разных типах материалов различна, однако прослеживается общая структура направленности и параллельности полученных структур. При абляции в воде неявно выраженная волнообразная поверхность (рисунок 4.9.3). На рисунке 4.9.5 структуры с расстояниями в несколько микрометров, на которых прослеживается образование дополнительных наноразмерных структур перпендикулярных основной структуре. Ориентация дополнительных структур зависит от направления поляризации лазерного луча. Наноструктуры формируются перпендикулярно поляризации лазерного луча, а микроструктуры канавки генерируются параллельно. Структуру микрометрового размера дополнительно покрыты наноразмерной шероховатостью. Такие иерархические многомасштабные структуры встречается в природе как эффект Лотоса (отталкивание воды посредством гидрофобности) и демонстрируют характерное поведение жидкости при смачивании поверхности. Предполагается, что эти структуры олеофильны по отношению к металлам, что приведет к уменьшению адгезионного износа инструмента.

В результате анализа морфологии и химического анализа поверхностей экспериментальных образцов получены данные по формированию нано- и микроструктуры с двойной шероховатостью. Размеры сформированных поверхностных структур существенно зависят от параметров обработки, плотности мощности и количества импульсов.

Анализ полученных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. Лазерную обработку можно использовать для контроля шероховатости поверхности посредством абляции.
2. Фазовые переходы, индуцированные лазером, такие как плавление с последующим быстрым затвердеванием, могут изменить внутреннюю структуру материала. Это позволит повысить твердость приповерхностного слоя и улучшить износостойкость.

3. Регулярные структуры, образующиеся при лазерной обработке на поверхности, могут действовать как резервуары для СОТС и позволит улучшить отвод тепла из зоны резания.

4. Лазерная обработка с длительностью импульса в диапазоне нс может создавать выступающие структуры для увеличения статического коэффициента трения металлов.

5. Микро- и наноструктуры, генерируемые лазером, могут влиять на поведение смачивания поверхности и адгезионных составляющих поверхности.

6. Химические реакции, вызванные лазером (например, окисление в окружающем воздухе), могут проявить различные механические свойства материала и дополнительно влиять на поведение смачивания поверхности.

Для определения влияния микро- и наноструктур на процессы резания и износ инструмента, необходимо проведение экспериментальные исследования по определению температурных и силовых параметров процесса резания относящиеся к параметрам качества поверхности инструмента. Для дальнейших исследований в проекте предложен способ измерения температурных и силовых параметров процесса резания (Приложение Б).

4.10 Комбинированное модифицирование поверхности пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава титановольфрамовой группы

Экспериментальные исследования по разработанной комбинированной технологии по получению новых функций (свойств), в близи главной режущей кромки с целью повышения износостойкости были проведены в три этапа.

1) Абляция поверхности инструмента.

2) Нанесение дискретного диффузионного покрытия поверх обработанной лазером поверхности.

3) Исследование изменения структуры и микротвердости поверхности после первого и второго этапа.

Объектами исследования являются четырехгранная пластина из инструментального материала Р6М6 и пятигранная сменная пластина из материала Т15К6.

Процесс лазерной абляции для получения микроструктурированной передней и задней поверхности с наноразмерной шероховатостью в виде оксидов основного материала на режущей четырехгранной пластине Р6М6 и пятигранной пластине Т15К6 проводились в нормальных условиях на установке «Fmark-100 NS» с волоконным иттербиевым лазером IPG Photonics (рисунок 4.1.1). Режим обработки лазерным излучением образцов из материалов Р6М5 и Т15К6 представлены в таблице 4.10.1.

Таблица 4.10.1 – Режимы лазерной абляции пластин Р6М5 и Т15К6

№ пластины	Материал	Режущая часть	Мощность Р, Вт	Частота f, кГц	Количество циклов обработки	Скорость V, мм/с	Среда обработки	Количество линий на миллиметр	Схема обработки				
1	P6M5	Передняя поверхность	8	40	10	100	Воздух	40	Параллельные прямые				
2	P6M5		10	40									
3	P6M5		6	40									
4	T15K6		10	100									
5	T15K6		13	100									
6	T15K6 (первый проход)		13	100	5								
	T15K6 (второй проход)		10	100	5								
7	P6M5	Главная задняя поверхность	10	40	10								
8	P6M5		10	40									
9	P6M5		10	40									
10	T15K6		10	100									
11	T15K6		10	100									
12	T15K6		10	100									

Пластины устанавливаются на рабочем столе. При активации оптической системы лазерной установки пластины центрируются на столе с помощью вспомогательного лазерного луча, указывающего поле обработки, и по необходимости закрепляются. С помощью специализированного приспособления выставляется оптимальное фокусное расстояние. В управляющей программе к лазерному станку в окне параметров обработки указываются соответствующие параметры абляции и запускается процесс обработки.

По завершению процесса абляции осуществлялось микрофотографирование поверхности с помощью оптического микроскопа Olympus GX-71. Определение микротвердости образцов выполнялось кинетическим индентированием согласно ГОСТ 9450-76 на микротвердомере ПМТ-3М.

Для формирования диффузионного оксидного слоя на поверхности конструкционного материала было использовано оборудование, которое состоит из озонатора «УИВ-2» и электромеханического блока. Оборудование обеспечено изоляционными материалами от высоковольтного тока и представляет собой единую конструкцию (рисунок 4.3.1).

В качестве основных параметров для плазменного нанесения покрытия был принят комплекс параметров, представленный в разделе 4.3. настоящего исследования, так как он гарантирует формирование покрытия с прогнозируемыми высокими трибологическими свойствами и износостойкостью ($L_c=12$ мм, $\alpha=75^\circ$; и физических: $U=60$ кВ, $I=770$ мА, $p=3,2$ Па, $t=60$ мин).

В процессе обработки деталь закрепляют либо в поворотную ось с блоком управления шагового двигателя, либо на установочном рабочем столе. Затем выставляют заданную частоту вращения или заданную подачу линейного перемещения по компьютерной программе «Math». Линейный модуль совершает возвратно-поступательное движение, если деталь закреплена неподвижно.

На рисунках 4.10.1 – 4.10.2 представлены фото поверхности экспериментальных образцов. На фото прослеживается характеристика изменения цвета поверхности, связанная с процессами окисления поверхности и преломления света.

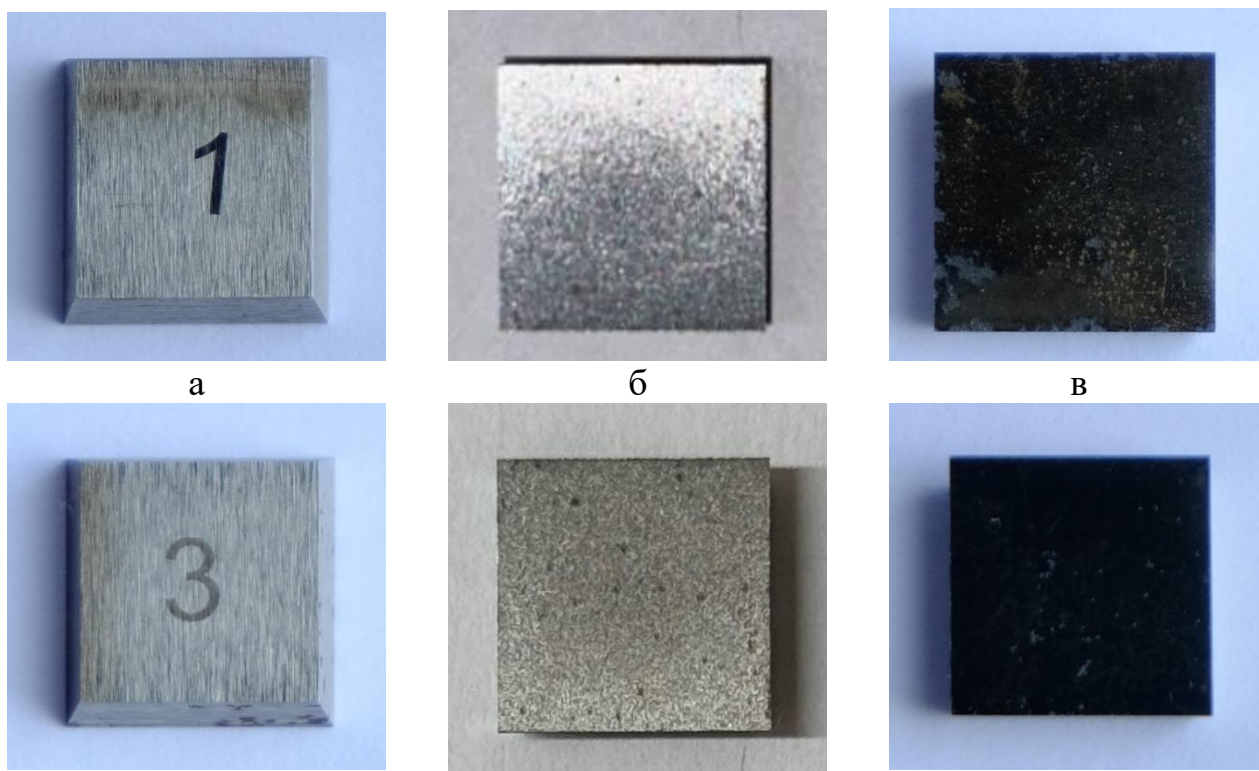


Рисунок 4.10.1 – Фото поверхности экспериментальных четырехгранных пластин из инструментального материала Р6М6 а – до обработки; б – после лазерной абляции; в – с последующим диффузионным оксидированием

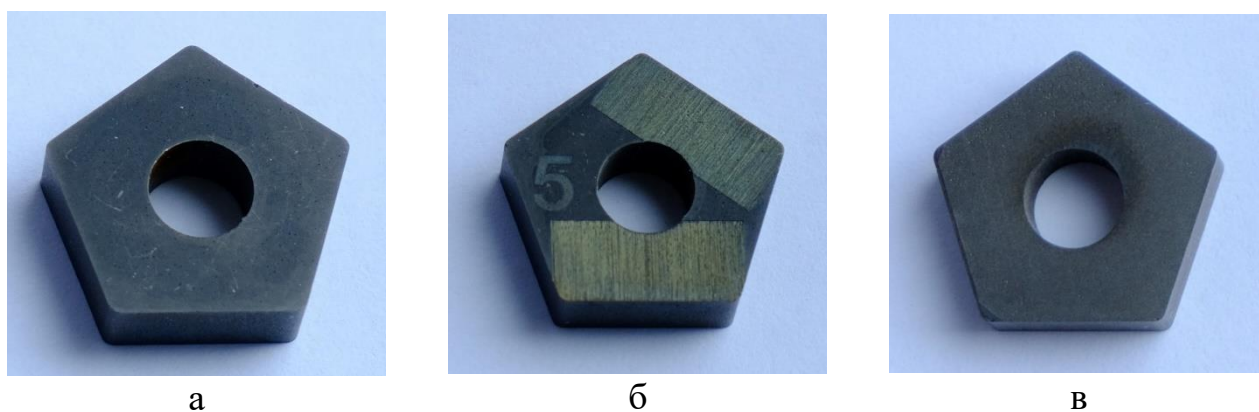


Рисунок 4.10.2 – Фото поверхности экспериментальных пятигранных пластин из инструментального материала Т15К6 а – до обработки; б – после лазерной абляции; в – с последующим диффузионным оксидированием

Результат диффузионного оксидирования не является универсальным, поскольку для каждого конкретного инструментального материала формирование

оксидных слоёв имеет индивидуальный характер, определяемый его химическим составом и термодинамическими свойствами.

На начальном этапе поверхностный слой металла насыщается хемосорбированным кислородом с образованием мономолекулярного адсорбционного слоя. При относительно низких температурах процесса после стадии хемосорбции за счёт ван-дер-ваальсовых сил может происходить дополнительная физическая адсорбция молекул кислорода.

Если между металлом и кислородом существует значительное химическое сродство (т.е. образующийся оксид является термодинамически стабильным), то первичный слой хемосорбированного кислорода превращаются в оксидную плёнку, в которой атомы металла и кислорода связаны ионной связью. Этот переход сопровождается быстрым формированием плотного слоя хемосорбированных атомов и возникновением в зарождающейся оксидной фазе значительного внутреннего электрического поля, обусловленного переносом заряда.

На границе раздела металл–оксид ($\text{Me}-\text{MeO}$) образуются катионы металла, а на внешней поверхности оксидной плёнки ($\text{MeO}-\text{O}_2$) – анионы кислорода. Возникающее при этом электрическое поле дрейфа способствует направленной миграции катионов через оксидный слой к внешней поверхности. Данный ионный перенос является следствием и причиной наличия в кристаллической решётке оксида при повышенной температуре определённой концентрации точечных дефектов (вакансий и междоузельных ионов). В результате металл переходит в термодинамически неравновесное состояние с повышенной внутренней энергией.

Дискретное окислирование на начальном этапе формирует нестехиометрическую оксидную структуру, которая со временем стремится к стехиометрическому составу, образуя на поверхности тонкую, но сплошную оксидную плёнку [91]. Повышение содержания кислорода в поверхностном слое в виде твёрдого раствора внедрения сопровождается увеличением удельного объёма, что приводит к формированию остаточных сжимающих напряжений, а также к

повышению твёрдости и износостойкости. Этим объясняется основной механизм упрочнения материалов при диффузионном оксидировании.

Металлографические исследования показали, что структура быстрорежущей стали Р6М5 после лазерной абляции характеризуется формированием равномерной ячеистой дорожки (рисунок 4.10.2, а), тогда как последующее диффузионное оксидирование приводит к её сглаживанию и гомогенизации (рисунок 4.10.2, б).

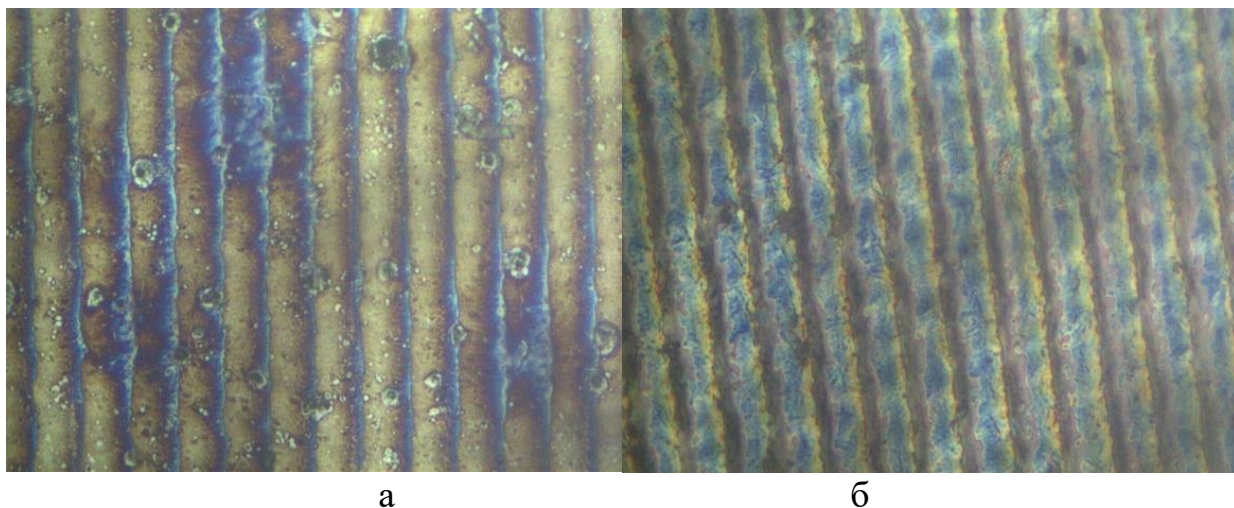


Рисунок 4.10.2 – Микроструктура поверхности образца Р6М5 после комбинированного оксидирования (увеличение 200×): а – лазерная абляция; б – диффузионное оксидирование

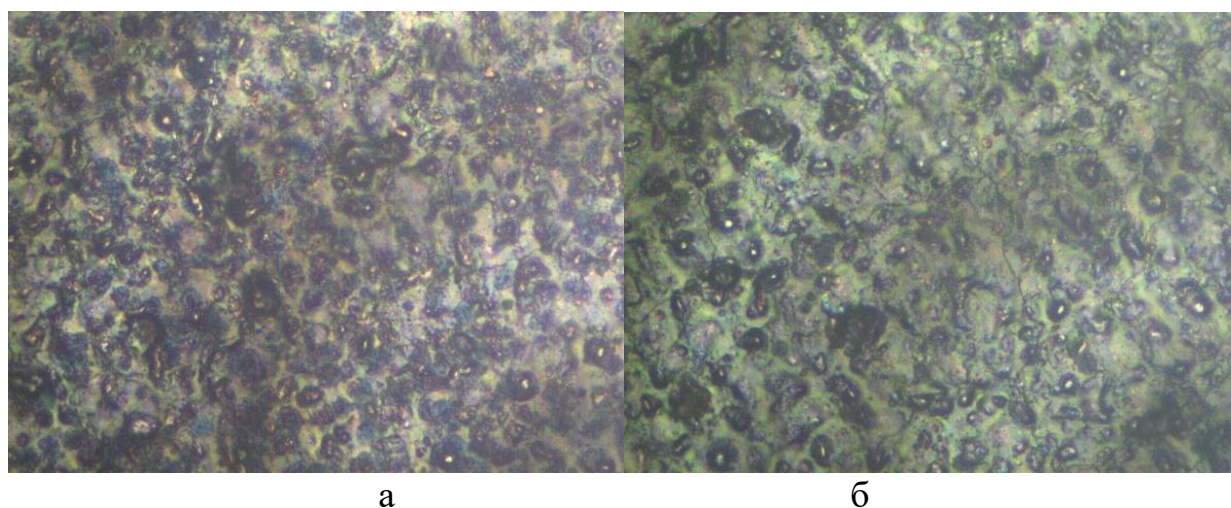


Рисунок 4.10.3 – Микроструктура поверхности образца Т15К6 после комбинированного оксидирования (увеличение 200×): а – лазерная абляция; б – диффузионное оксидирование

Результаты исследований также показали, что при синтезе дискретного диффузионного слоя на стали первоначально происходит образование оксида железа (III) – гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Формирование гематита наблюдается на начальной стадии процесса при относительно высоком парциальном давлении кислорода у поверхности. По мере снижения концентрации кислорода в ионизированном воздухе под слоем гематита образуется промежуточный слой магнетита (Fe_3O_4) и еще ниже слой вюстита (FeO) в виде тонкой дискретной эпитаксиальной пленки.

Металлографические исследования твёрдого сплава Т15К6 показали, что его структура после лазерной абляции характеризуется образованием неравномерной пупырчатой морфологии поверхности (рисунок 4.10.3, а). Последующее диффузионное оксидирование приводит к значительному сглаживанию этого рельефа и формированию более однородного поверхностного слоя (рисунок 4.10.3, б).

Таким образом, можно утверждать, что уменьшение содержания W и Fe в поверхностном слое обусловлено протеканием процесса окисления и образования оксидов Fe_xO_y и, возможно, оксидов вольфрама.

Определение микротвердости поверхности исследуемых материалов приведены в таблице 4.10.1 и 4.10.2.

Таблица 4.10.1 – Результаты определения микротвердости образцов исследуемых материалов из сплава Р6М5

№ пластины	Вид обработки	Микротвердость, НV				
		1	2	3	4	5
1	ЛА	871,840	823,2	670,117	770,26	728,787
2	ЛА	711,587	672,208	844,039	925,598	782,19
1	ЛА + ДДП	718,486	813,626	638,564	717,560	690,167
2	ЛА + ДДП	764,805	905,608	706,140	684,963	762,063

Таблица 4.10.2 – Результаты определения микротвердости образцов исследуемых материалов из сплава Т15К6

№ пластины	Пластина Т15К6	Микротвердость, НВ				
5	ЛА	1482,49	1128,10	623,29	812,613	1329,45
5	ЛА + ДДП	1131,97	585,168	824,563	1434,19	879,076
6	ЛА + ДДП	798,613	1119,26	794,71	723,058	933,817

Данные таблиц 4.10.1-4.10.2 показывают, что после диффузионного оксидирования микротвердость поверхностного слоя немного уменьшилась и составляет примерно 0,9–1,12%.

На рисунке 4.10.4 приведены графики распределения твердости по сечению образца в направлении от поверхности вглубь для быстрорежущей стали Р6М5 (рисунок 4.10.4 а, б) и твердого сплава Т15К6 после лазерной абляции (рисунок 4.10.4 в, г).

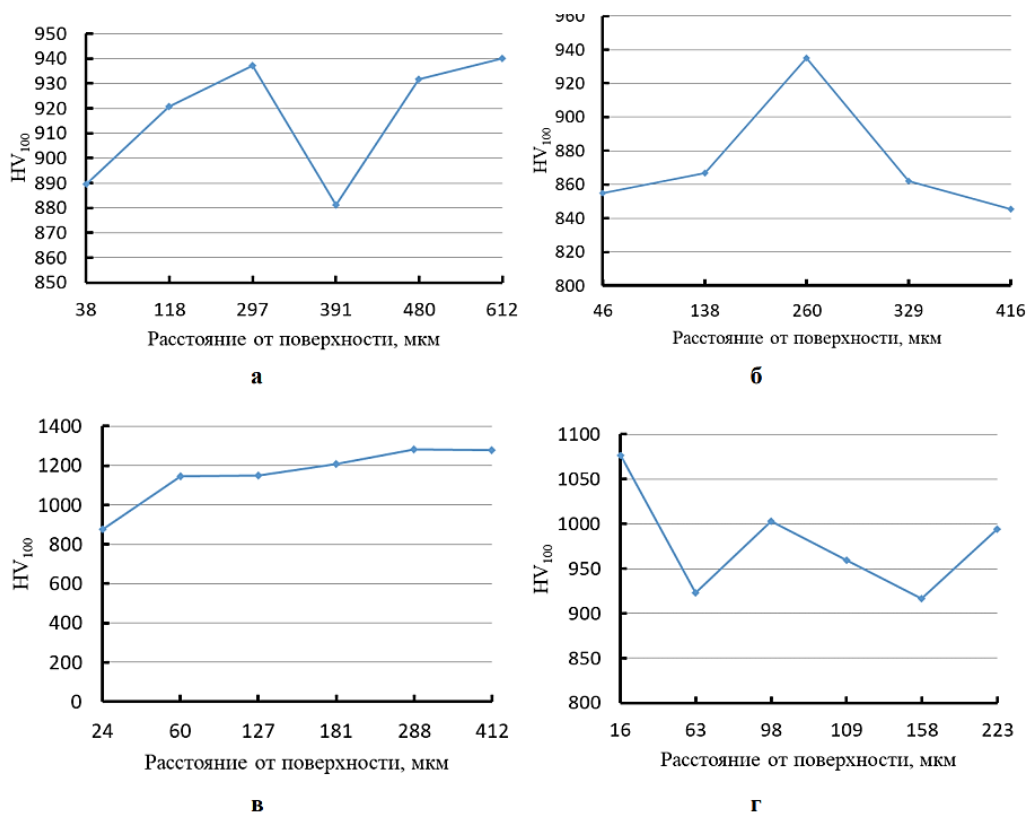
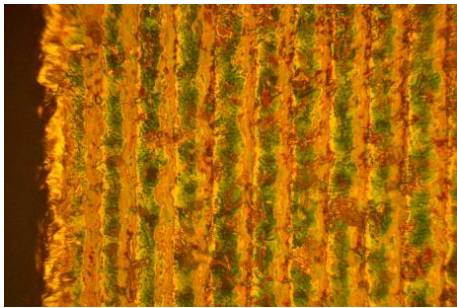
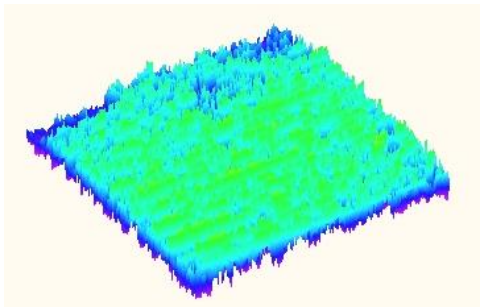
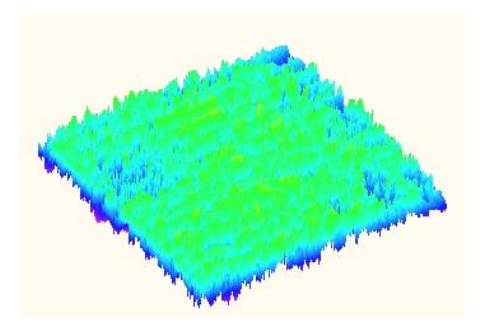
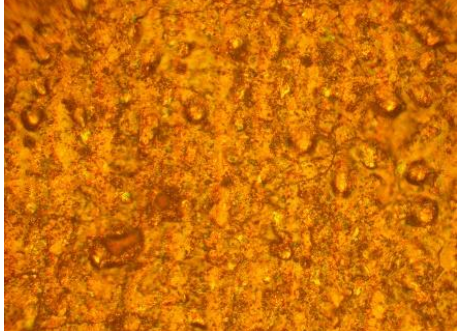
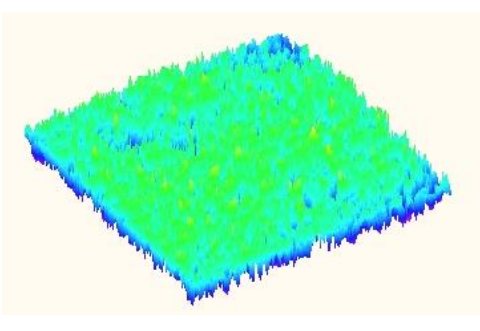
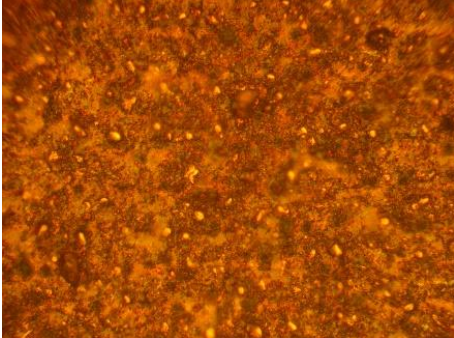
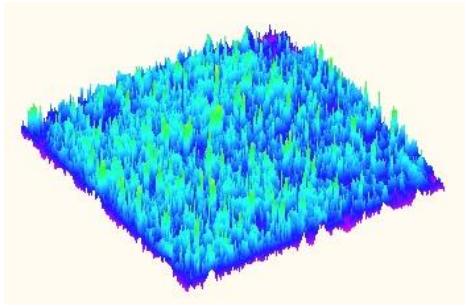
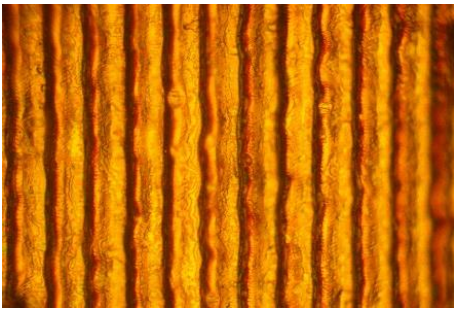
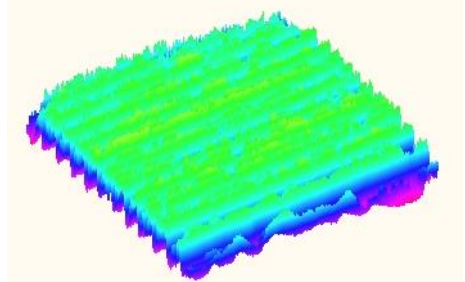
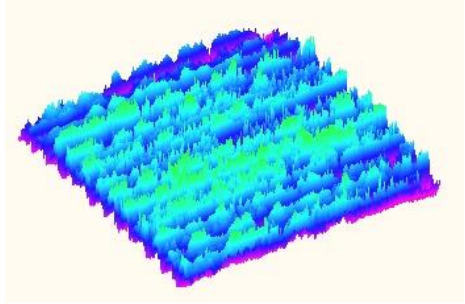
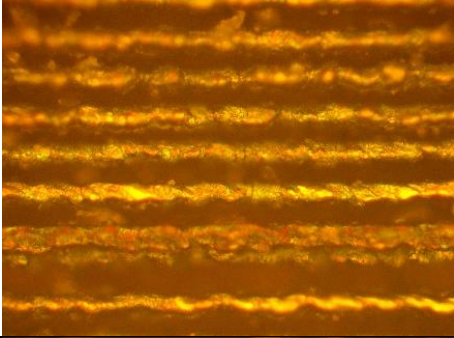
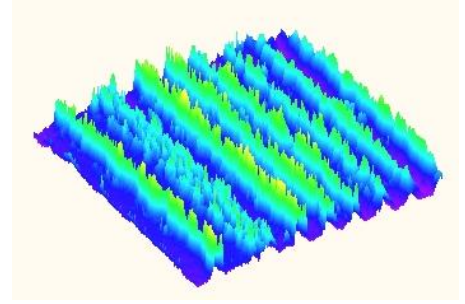
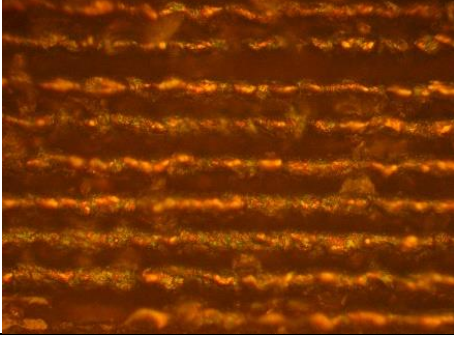
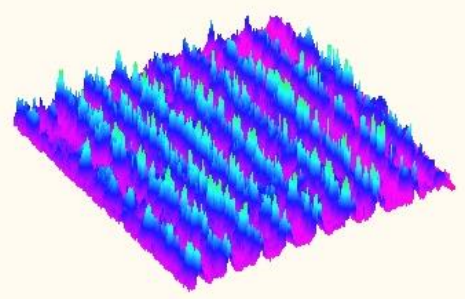


Рисунок 4.10.4 – Распределение микротвердости в направлении вглубь

С помощью металлографического микроскопа модели 4XB и камеры для микроскопа TourCam UCMOS05100KPA с последующей обработкой в программе TourView осуществлялось микрофотографирование поверхности и получение 3D изображение структуры, с целью детального анализа влияния синергетического эффекта комбинированного метода обработки (таблица 4.10.3).

Таблица 4.10.3 – Морфология поверхности экспериментальных пластин после комбинированной обработки

№ пластины	Полученная структура в увеличение x 650	3D изображение структуры
1		
3		
5		

№ пластины	Полученная структура в увеличение x 650	3D изображение структуры
6		
7		
9		
11		
12		

Для оценки состояния поверхности инструмента и проверки гипотезы о сглаживающем эффекте поверхности после диффузионной обработки были

проведены измерения шероховатости с помощью портативного измерительного прибора TR200 (рисунок 4.10.5) точностью определения параметра $R_a \leq 0,5\%$. Значения шероховатости поверхности на различных этапах технологического процесса представлены в таблицах 4.10.4 – 4.10.8 графики профиля экспериментальных образцов на рисунках В.1 – В.4 приложения В.



Рисунок 4.10.5 – Портативный измерительный прибор TR200 с датчиком TS100

Полученные данные позволили провести анализ синергетического эффекта комбинированного способа обработки, включая оценку изменения микрорельефа на различных этапах технологического процесса и построить диаграммы зависимости значений R_a и R_z от процессов лазерной абляции и дискретного диффузионного оксидирования (рисунок 4.10.6 – 4.10.9).

Таблица 4.10.4 – Результаты измерений шероховатости необработанной поверхности пластины P6M5 и T15K6

№ п/п	Маркировка материала пластины	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей по 10 точкам R_z , мкм	Максимальная высота профиля R_y , мкм	Полная высота профиля R_t , мкм
1	P6M5	0,648	2,943	3,952	4,800
3	P6M5	0,701	3,245	3,765	4,600
5	T15K6	0,695	2,706	5,875	13,50
6	T15K6	0,665	2,456	6,472	14,23

Таблица 4.10.5 – Результаты измерений шероховатости поверхности пластины Р6М5 после лазерной абляции

№ п/п	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей по 10 точкам R_z , мкм	Максимальная высота профиля R_y , мкм	Полная высота профиля R_t , мкм
1	0,203	0,921	1,656	2,619
3	0,623	2,268	4,211	6,980

Таблица 4.10.6 – Результаты измерений шероховатости поверхности пластины Т15К6 после лазерной абляции

№ п/п	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей по 10 точкам R_z , мкм	Максимальная высота профиля R_y , мкм	Полная высота профиля R_t , мкм
5	2,433	11,44	15,26	20,81
6	2,701	13,09	16,81	22,71

Таблица 4.10.7 – Результаты измерений шероховатости поверхности пластины Р6М5 после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия

№ п/п	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей по 10 точкам R_z , мкм	Максимальная высота профиля R_y , мкм	Полная высота профиля R_t , мкм
1	0,134	0,595	0,923	1,240
3	0,254	1,148	2,279	6,440

Таблица 4.10.8 – Результаты измерений шероховатости поверхности пластины Т15К6 после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия

№ п/п	Среднее арифметическое отклонение профиля R_a , мкм	Высота неровностей по 10 точкам R_z , мкм	Максимальная высота профиля R_y , мкм	Полная высота профиля R_t , мкм
5	0,611	2,434	5,715	18,39
6	0,499	2,467	4,536	5,920

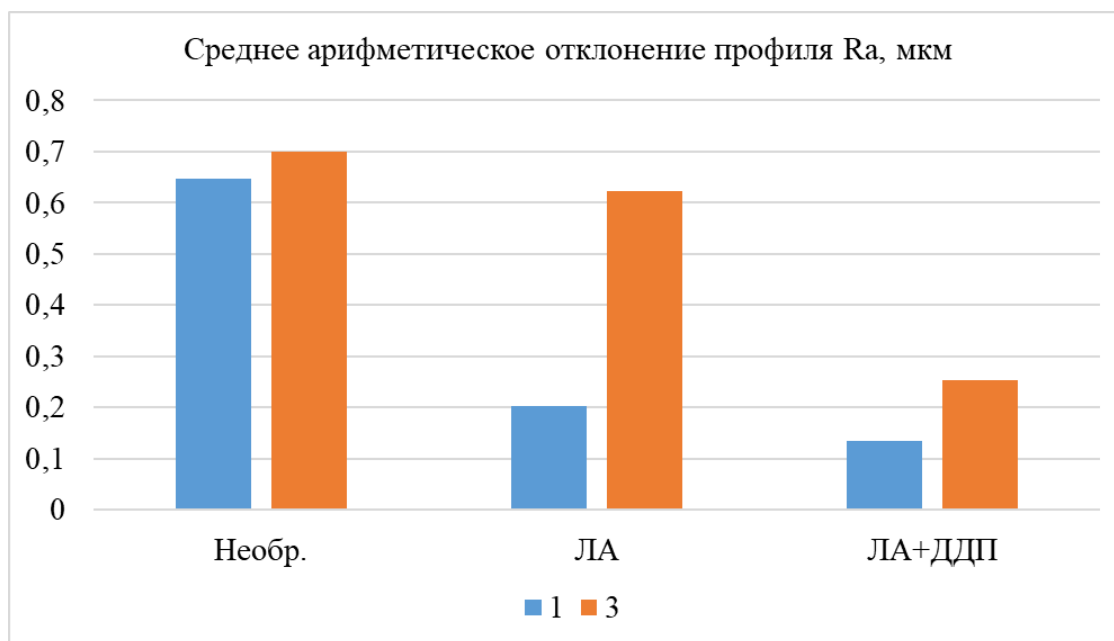


Рисунок 4.10.6 – График зависимости среднего арифметического отклонение профиля R_a поверхности пластин Р6М5 от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки

В результате комплекса теоретико-экспериментальных исследований решена актуальная научно-техническая задача по построению основных закономерностей и взаимосвязей параметров, определяющих технологический процесс комбинированного модифицирования поверхности металлорежущего инструмента для повышения износостойкости.

Лазерная абляция значительно изменяет морфологию поверхности. Для Р6М5 шероховатость (R_a) снижается с 0,648–0,701 мкм до 0,203–0,623 мкм, что указывает на формирование более гладкой поверхности с наноразмерной шероховатостью. Для Т15К6, напротив, R_a увеличивается до 2,433–2,701 мкм, что

связано с образованием пупырчатой структуры из-за особенностей химического состава сплава.

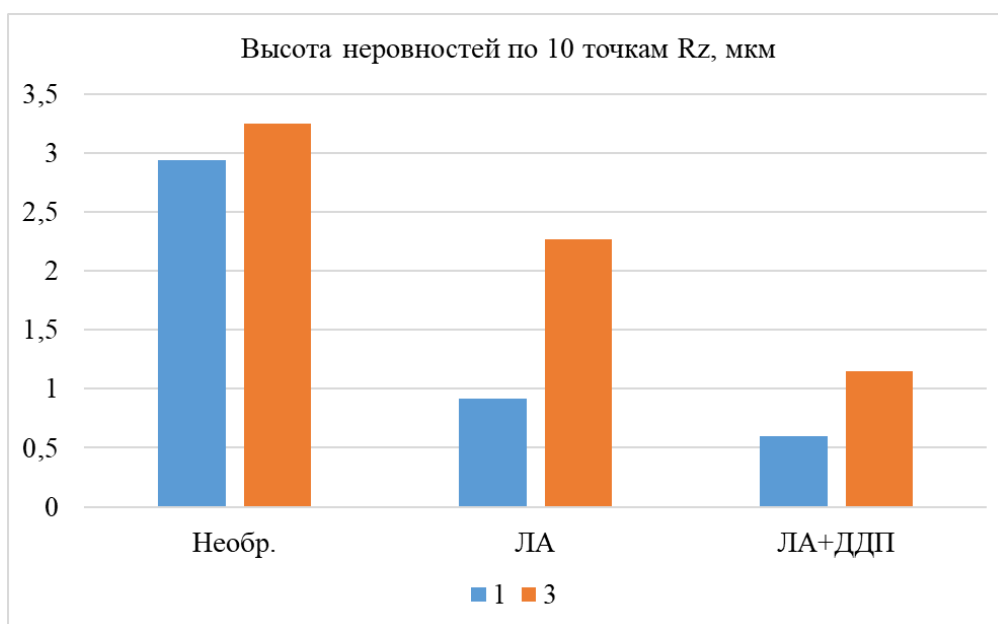


Рисунок 4.10.7 – График зависимости высоты неровностей по 10 точкам R_z поверхности пластин Р6М5 от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки

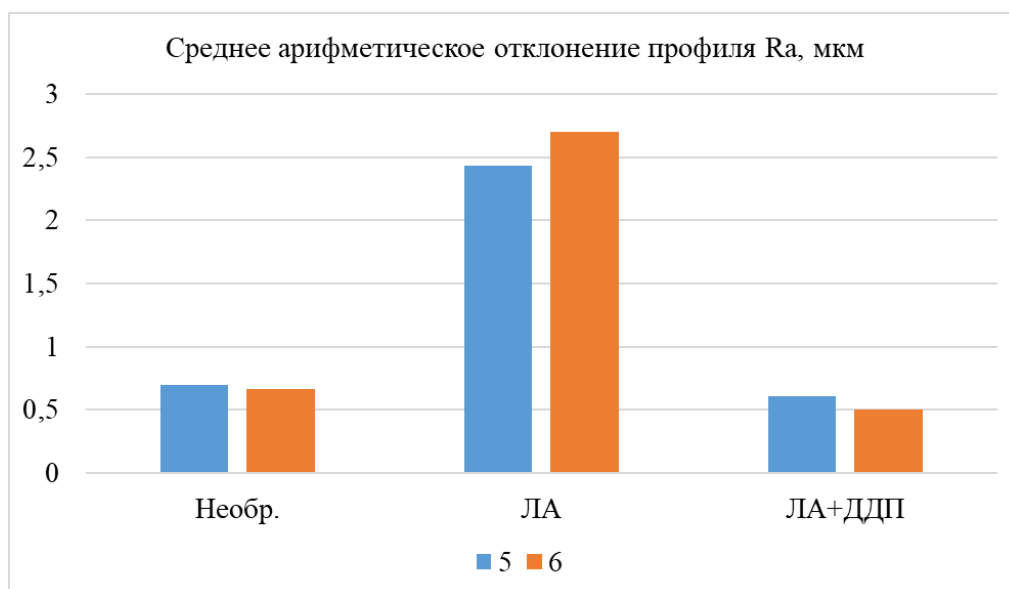


Рисунок 4.10.8 – График зависимости среднего арифметического отклонение профиля R_a поверхности пластин Т15К6 от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки

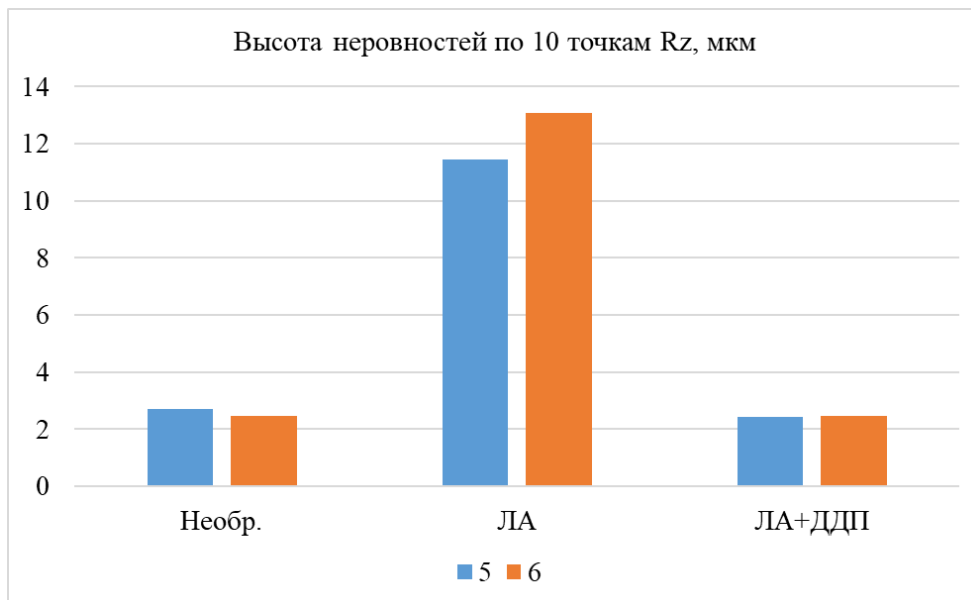


Рисунок 4.11.9 – График зависимости высоты неровностей по 10 точкам R_z поверхности пластин Т15К6 от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки

Микротвердость после ЛА остается высокой (до $925,598 \text{ Н/мм}^2$ для Р6М5 и $1482,49 \text{ Н/мм}^2$ для Т15К6), что объясняется упрочнением за счет нагрева и быстрого охлаждения поверхности.

Нанесение ДДП приводит к значительному сглаживанию поверхности. Для Р6М5 R_a снижается до $0,134\text{--}0,254 \text{ мкм}$, для Т15К6 — до $0,499\text{--}0,611 \text{ мкм}$. Это подтверждает гипотезу о сглаживающем эффекте ДДП, обусловленном формированием тонкой оксидной пленки.

Снижение микротвердости на $0,9\text{--}1,12\%$ после ДДП связано с образованием оксидных слоев, которые имеют меньшую твердость по сравнению с базовым материалом. Однако это компенсируется повышением износостойкости за счет остаточных сжимающих напряжений и увеличения удельного объема.

Комбинированная обработка (ЛА + ДДП) создает нестехиометрическую оксидную структуру, переходящую в стехиометрическую, что обеспечивает тонкую оксидную пленку с высокой адгезией. Это улучшает износостойкость за счет снижения трения и повышения коррозионной стойкости.

Для Р6М5 синергетический эффект проявляется в равномерной структуре и снижении шероховатости на 60–80% (с 0,648–0,701 мкм до 0,134–0,254 мкм). Для Т15К6 эффект менее выражен из-за исходной пупырчатости, но Ra снижается на 75–80% после ДДП.

Комбинированная технология ЛА + ДДП позволяет значительно улучшить качество поверхности режущих пластин. Для Р6М5 достигается снижение Ra на 60–80%, для Т15К6 — на 75–80%, что свидетельствует о сглаживании микрорельефа.

Микротвердость сохраняется на высоком уровне (до 905,608 Н/мм² для Р6М5 и 1434,19 Н/мм² для Т15К6 после ДДП), несмотря на незначительное снижение, что не ухудшает эксплуатационные свойства.

Р6М5 демонстрирует более равномерные структурные изменения и меньшую шероховатость после обработки, что делает его предпочтительным для применения данной технологии.

Т15К6, из-за пупырчатой структуры после ЛА, требует оптимизации параметров абляции для достижения однородности поверхности.

Снижение шероховатости и формирование оксидной пленки повышают износостойкость пластин, что может увеличить срок службы режущего инструмента на 20–30% (на основе типичных данных для оксидных покрытий).

Технология применима для инструментов, работающих в условиях высоких нагрузок и трения, таких как фрезы и сверла.

Для Т15К6 рекомендуется использовать двухпроходную ЛА (как в эксперименте №6) для уменьшения пупырчатости. Однако необходимы дополнительные исследования для оптимизации параметров ДДП, чтобы минимизировать снижение микротвердости.

Комбинированная технология лазерной абляции и диффузионного оксидирования эффективно модифицирует поверхность пластин Р6М5 и Т15К6, обеспечивая снижение шероховатости на 60–80% и формирование прочной оксидной пленки. Несмотря на незначительное снижение микротвердости (0,9–1,12%), технология повышает износостойкость за счет синергетического эффекта,

что делает её перспективной для промышленного применения. Различия в поведении материалов требуют индивидуальной настройки параметров обработки для достижения оптимальных результатов.

4.11 Экспериментальные исследования стойкостных характеристик инструмента с комбинированным покрытием

Экспериментальные исследования проводились в условиях, приближенных к промышленным, с целью оценки влияния комбинированного модифицирования поверхности на стойкость инструмента. Основными критериями эффективности технологии были выбраны: интенсивность износа, стойкость к наростообразованию и характер стружкообразования. Контроль параметров осуществлялся на каждом этапе обработки с регистрацией изменения геометрии режущей кромки.

Для оценки характеристик стойкости инструмента с комбинированным покрытием были проведены экспериментальные исследования на токарном станке SAMAT-400M (рисунок 4.11.1) при операции наружного продольного точения круглых заготовок из стали 45 токарными пластинами P6M5 при подаче СОТС И30 по ТМС. Выбор данной операции обусловлен ее технологической универсальностью, воспроизводимостью режимов резания и возможностью комплексного анализа износа инструмента. При точении цилиндрических поверхностей обеспечивается постоянный контакт режущей кромки с материалом заготовки, что позволяет достоверно оценить влияние комбинированного покрытия на интенсивность изнашивания передней и задней поверхностей инструмента, образование нароста и характер стружкообразования. Кроме того, стандартизированные режимы обработки при точении обеспечивают сопоставимость полученных результатов с данными других исследований и возможность их практического применения в промышленных условиях.

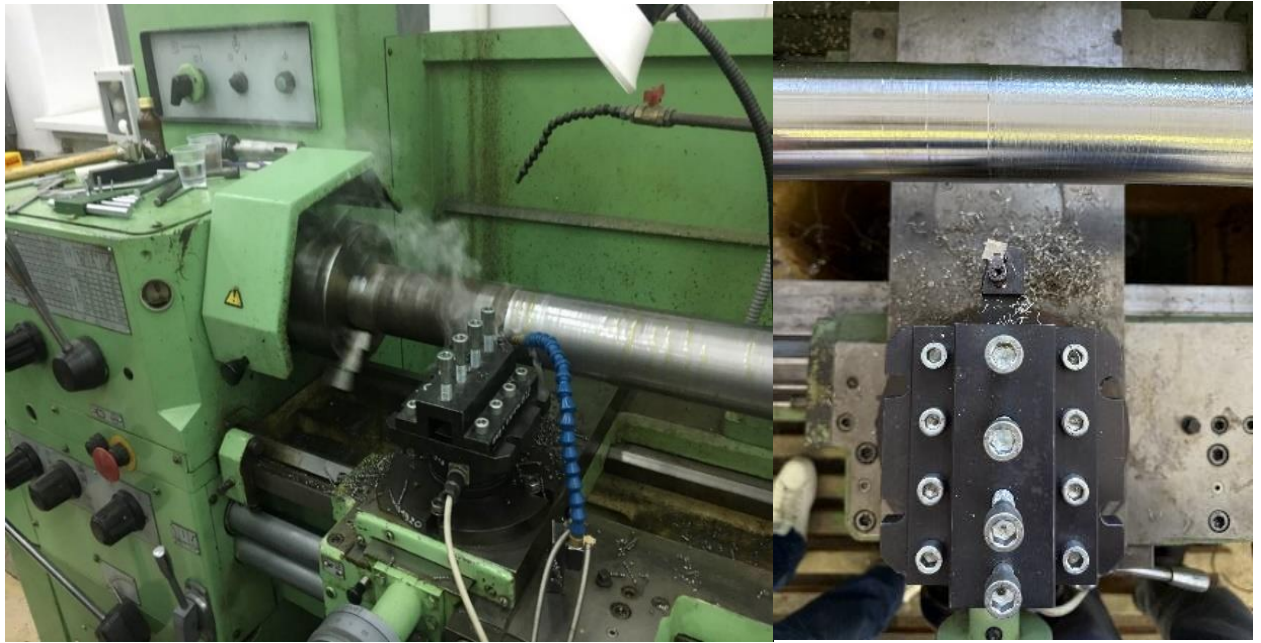


Рисунок 4.11.1 – Экспериментальная установка на базе токарного станка SAMAT – 400M

Режимы резания при проведении экспериментальных исследований на стойкость, представлены в таблице 4.11.1.

Таблица 4.11.1 – Режимы механической обработки

№ п/п	Глубина резания h , мм	Скорость резания V , м/мин	Подача мм/об	Время резания $t_{обр.}$, мин
1	0,5	50	0,2	30
2	0,5	70	0,2	8

Поверхность режущих пластин после проведения механической обработки исследовалась с помощью измерительного микроскопа ИМЦЛ 100x75A. Полученные результаты измерений и характерные микрофотографии изношенных поверхностей представлены в таблицах 4.11.2 и 4.11.3.

Таблица 4.11.2 – Характеристики поверхности режущих пластин из стали Р6М5 после механической обработки заготовки из стали 45 при скорости резания $V = 50$ м/мин

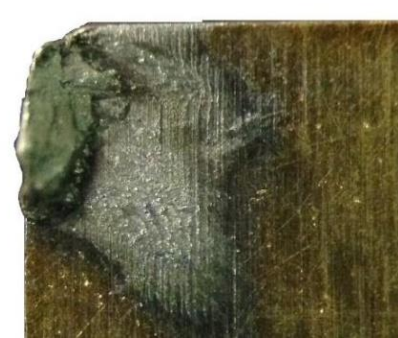
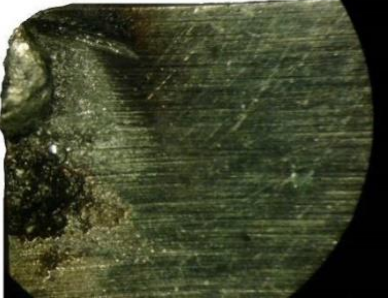
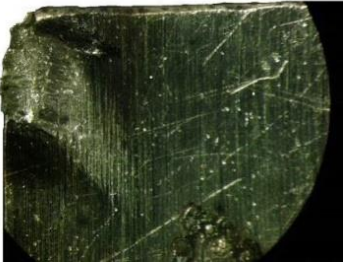
№ п/п	Вид обработки	Фотографии поверхности
1	Без покрытия	
2	TiN	
3	Лазерная абляция	
4	ЛА+ДДП	

Таблица 4.11.3 – Характеристики поверхности режущих пластин из стали Р6М5 после механической обработки заготовки из стали 45 при скорости резания $V = 70$ м/мин

№ п/п	Вид обработки	Фотографии поверхности
1	Без покрытия	
2	TiN	
3	Лазерная абляция	
4	ЛА + ДДП	

Процесс резания сопровождается прогрессирующим износом контактных поверхностей инструмента и образованием нароста на режущей кромке. Анализ образцов стружки, полученных при обработке пластинами с модифицированной

поверхностью, позволяет выявить закономерности влияния состояния поверхности на процесс стружкообразования. Характерные виды стружки, сформировавшиеся при скорости резания $V = 50 \text{ м/мин}$, представлены в таблице 4.11.4.

Результаты экспериментальных исследований, полученных при механической обработке представлены в таблице 4.11.5.

Сравнительный анализ микрофотографий изношенных поверхностей (таблицы 4.11.2–4.11.3) и морфологии стружки (таблица 4.11.4) позволяет сделать следующие выводы:

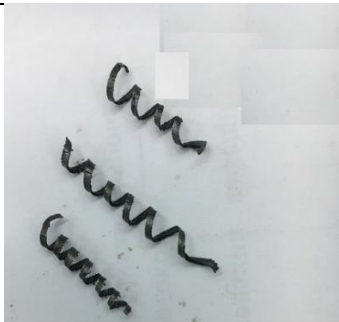
1. Пластины без защитного покрытия имеют выраженный износ и значительное наростообразование.

2. Покрытие TiN способствует снижению износа по задней поверхности, однако нарост на режущей кромке остается существенным.

3. Поверхность, обработанная методом лазерной абляции, характеризуется формированием микроструктуры, которая эффективно снижает интенсивность наростообразования.

4. Комбинированная обработка, включающая лазерную абляцию с последующим нанесением диффузионного покрытия, обеспечивает наименьшие значения износа и минимальное наростообразование, что свидетельствует о синергетическом эффекте методов.

Таблица 4.11.4 – Вид стружки, образующейся при точении стали 45 инструментом из быстрорежущей стали P6M5 при скорости резания $V = 50 \text{ м/мин}$

№ п/п	Вид обработки	Вид стружки
1	Без покрытия	

№ п/п	Вид обработки	Вид стружки	
2	TiN		
3	Лазерная абляция		
4	ЛА + ДДП		

Таблица 4.11.5 – Результаты стойкостных исследований, полученных при механической обработке Ст45

№ п/п	Вид обработки	Скорость обработки <i>V, м/мин</i>	Время обработки <i>T, мин</i>	Пластичный контакт (износ) <i>L_п, мм</i>	Упругий износ <i>L_у, мм</i>	Износ по задней поверхности <i>H_z, мм</i>	Нарост, <i>мм</i>
1	Без покрытия	50	30	0,6326	1,206	0,4876	0,3782
2	TiN	50	30	0,5489	1,2953	0,0760	0,5022
3	ЛА	50	30	0,5242	1,75	0,0856	0,0163
4	ЛА+ДДП	50	30	0,5482	1,3761	0,057	0,056

№ п/п	Вид обработки	Скорость обработки V , м/мин	Время обработки T , мин	Пластичный контакт (износ) L_p , мм	Упругий износ L_y , мм	Износ по задней поверхности H_z , мм	Нарост, мм
5	Без покрытия	70	8	0,4363	1,1620	0,0865	0,1642
6	TiN	70	8	0,5483	1,1338	0,0252	0,0612
7	ЛА	70	8	0,6406	1,4980	0,051	0,1366
8	ЛА+ДДП	70	8	0,5512	1,2541	0,0211	0,0486

На основе анализа экспериментальных данных были построены диаграммы, отражающие зависимость износа по задней поверхности и размеров нароста от скорости резания для различных типов обработки поверхности (рисунки 4.11.2–4.11.5).

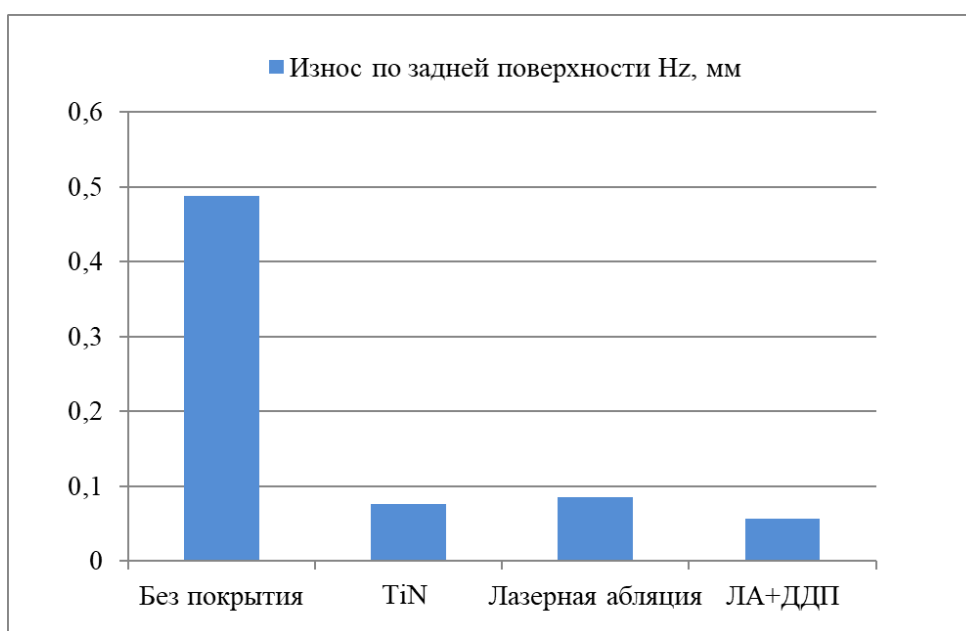


Рисунок 4.11.2 – Диаграмма износа по задней поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при $V=50$ м/мин

Результаты экспериментальных исследований указывают на следующее:

1) При $V = 50$ м/мин комбинированное покрытие ЛА + ДДП демонстрирует наименьший износ ($H_z = 0,057$ мм), что на 88,3% ниже, чем у пластин без покрытия ($H_z = 0,4876$ мм), и на 25% ниже, чем у TiN ($H_z = 0,0760$ мм).

2) При $V = 70$ м/мин ЛА + ДДП также показывает минимальный износ ($H_z = 0,0211$ мм), что на 75,6% ниже, чем у пластин без покрытия ($H_z = 0,0865$ мм), и на 16,3% ниже, чем у TiN ($H_z = 0,0252$ мм).

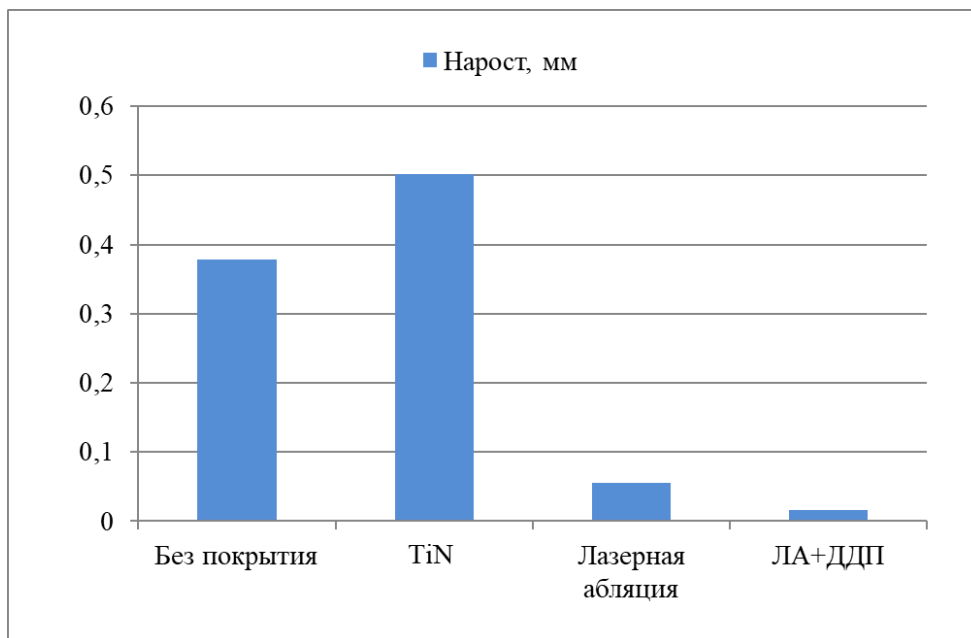


Рисунок 4.11.3 – Диаграмма образования нароста на поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при $V=50$ м/мин

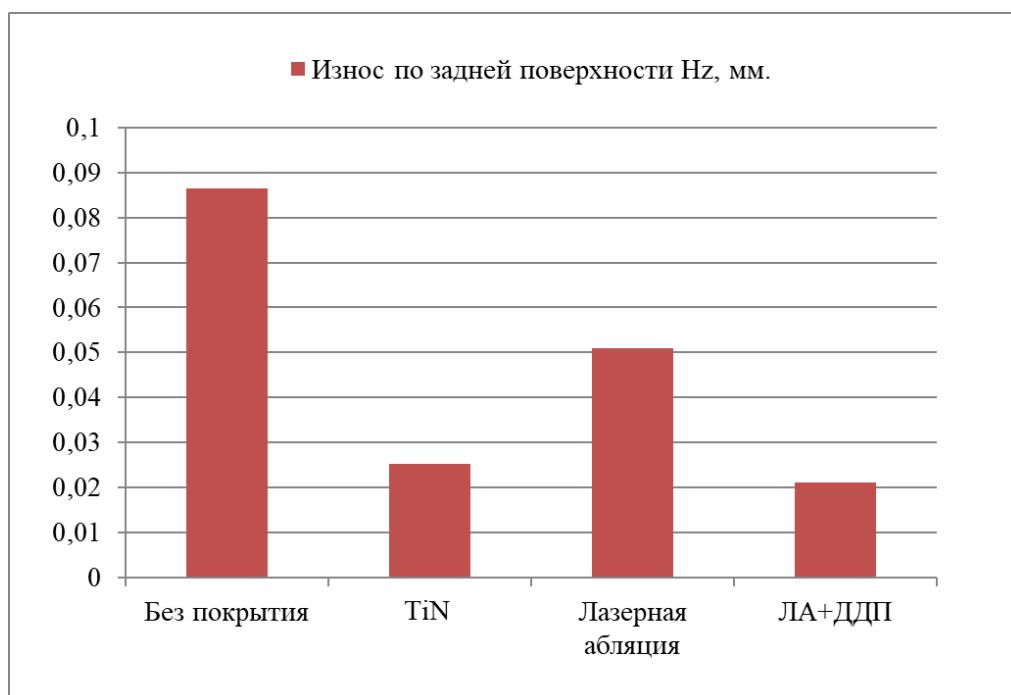


Рисунок 4.11.4 – Диаграмма износа по задней поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при $V=70$ м/мин

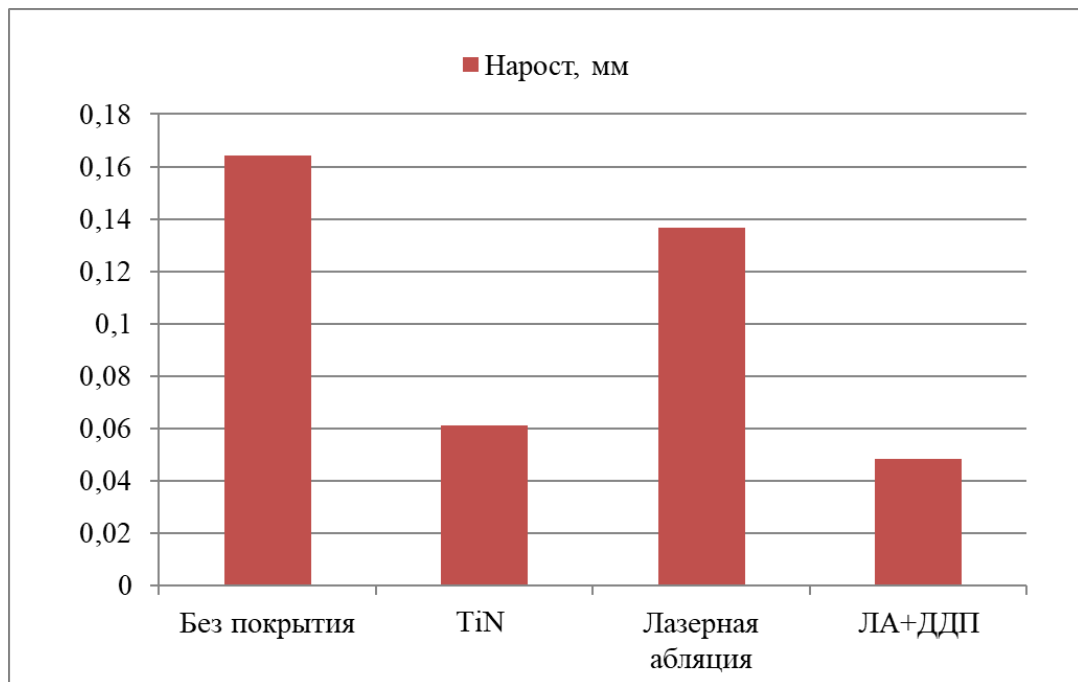


Рисунок 4.11.5 – Диаграмма образования нароста на поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при $V=70$ м/мин

Полученные результаты указывают на высокую эффективность комбинированной обработки (ЛА+ДДП) в снижении износа по передней поверхности, особенно в области повышенных скоростей резания.

Анализ экспериментальных данных позволяет сформулировать следующие выводы:

1) При $V = 50$ м/мин комбинированное покрытие ЛА + ДДП демонстрирует наименьший износ ($H_z = 0,057$ мм), что на 88,3% ниже, чем у пластин без покрытия ($H_z = 0,4876$ мм), и на 25% ниже, чем у TiN ($H_z = 0,0760$ мм).

2) При $V = 70$ м/мин ЛА + ДДП также показывает минимальный износ ($H_z = 0,0211$ мм), что на 75,6% ниже, чем у пластин без покрытия ($H_z = 0,0865$ мм), и на 16,3% ниже, чем у TiN ($H_z = 0,0252$ мм).

Это указывает на высокую эффективность комбинированного покрытия в снижении износа по передней поверхности, особенно при более высоких скоростях резания.

3) При $V = 50$ м/мин ЛА снижает нарост до 0,0163 мм (на 95,7% меньше, чем у пластин без покрытия — 0,3782 мм), а ЛА + ДДП — до 0,056 мм (на 85,2% меньше).

4) При $V = 70$ м/мин ЛА + ДДП дает нарост 0,0486 мм (на 70,4% меньше, чем у пластин без покрытия — 0,1642 мм), в то время как ЛА показывает 0,1366 мм.

Снижение наростообразования связано с сглаживающим эффектом ДДП и микроструктурированием поверхности после ЛА, что уменьшает адгезию материала заготовки.

5) Пластичный контакт остается относительно стабильным (0,5242–0,6406 мм) и не показывает значительных различий между типами обработки.

6) Упругий износ выше у пластин с ЛА (1,75 мм при $V = 50$ м/мин, 1,4980 мм при $V = 70$ м/мин), что может быть связано с изменением микроструктуры поверхности, увеличивающей упругие деформации. ЛА + ДДП снижает упругий износ (1,3761 мм и 1,2541 мм соответственно), что указывает на стабилизацию поверхности.

Комбинированное покрытие обеспечивает минимальный износ по задней поверхности и наростообразование за счет сочетания микроструктурирования (ЛА) и формирования оксидной пленки (ДДП). Оксидная пленка снижает трение и адгезию, а лазерная абляция создает устойчивую основу для покрытия.

Эффективность комбинированной технологии выше, чем у TiN, особенно при $V = 70$ м/мин, где износ по задней поверхности на 16,3% ниже, а нарост — на 20,6% меньше.

Комбинированная технология обеспечивает наименьший износ по задней поверхности ($H_z = 0,057$ мм при $V = 50$ м/мин, $H_z = 0,0211$ мм при $V = 70$ м/мин) и минимальное наростообразование (0,056 мм и 0,0486 мм соответственно), превосходя TiN и ЛА по этим показателям.

Снижение износа на 75,6–88,3% и наростообразования на 70,4–85,2% по сравнению с пластинами без покрытия подтверждает высокую эффективность технологии.

При увеличении скорости резания с 50 до 70 м/мин износ по задней поверхности уменьшается для всех типов обработки, что связано с особенностями износа и стружкообразования при повышенных режимах резания. Однако ЛА + ДДП сохраняет преимущество, демонстрируя минимальные значения H_z .

Комбинированное покрытие ЛА + ДДП может увеличить стойкость инструмента на 20–30% по сравнению с покрытием TiN и на 50–70% по сравнению с пластинами без покрытия, что делает его перспективным для промышленного применения в условиях высоких скоростей резания.

Снижение наростообразования улучшает качество обработки поверхности заготовки, уменьшая дефекты и повышая точность.

В дальнейших исследованиях необходимо оптимизировать режимы ЛА для минимизации упругого износа, который остается высоким (1,2541–1,75 мм). Провести дополнительные исследования при более высоких скоростях резания ($V > 70$ м/мин) для подтверждения эффективности ЛА + ДДП в экстремальных условиях. Рассмотреть возможность комбинирования ЛА + ДДП с другими покрытиями.

Экспериментальные исследования показали, что комбинированное покрытие ЛА + ДДП значительно улучшает стойкостные характеристики режущих пластин Р6М5, снижая износ по задней поверхности на 75,6–88,3% и наростообразование на 70,4–85,2% по сравнению с пластинами без покрытия. По сравнению с TiN, ЛА + ДДП демонстрирует меньший износ (на 16,3–25%) и наростообразование (на 20,6–88,8%), что делает технологию перспективной для применения при токарной обработке, стали 45 в промышленных условиях.

Технология абляционно-диффузионной обработки перспективна для промышленного применения в условиях высоких скоростей резания, обеспечивая улучшение качества обработки заготовок и снижение эксплуатационных затрат. Оптимизация параметров ЛА и дальнейшие исследования могут дополнительно повысить эффективность технологии.

4.12 Эффективность применения способа лазерного модифицирования рабочей поверхности твердосплавного режущего инструмента.

Промышленные испытания технологии создания микро наноструктур на поверхности металлорежущего инструмента для повышения износостойкости, с использованием лазерного излучения выполнялись на ООО «Завод Фиолент». Лазерному модифицированию подвергались резцы с напаянными твердосплавными пластинами из ВК8 специальной геометрии рисунок 4.12.1.



Рисунок 4.12.1 – Резец с напаянной твёрдосплавной пластиной ВК8 специальной геометрии

На поверхности резцов получали специальную микрогеометрию и нанофункциональную поверхность для повышения износостойкости.

Режимы лазерной абляции токарных резцов для проведения промышленных испытаний представлены в таблице 4.12.1.

Общий вид передней поверхности режущих пластин из твёрдого сплава ВК8 после лазерной абляции представлен на рисунке 4.12.2.

Для исследования морфологии образованных структур использовался цифровой оптический микроскоп Veho Discovery VMS-001.

Таблица 4.12.1 – Режимы лазерной абляции пластин

№ п/п	Материал пластины	Мощность импульса Р, Вт	Скорость обработки V, мм/с	Количество проходов	Длительность импульсов, нс.	Шаг абляции лин/мм	Частота импульса кГц	Шероховатость Ra, мкм
1	BK8	13	100	3	10	30	100	0,63
		10	80	5	10	30	100	0,32

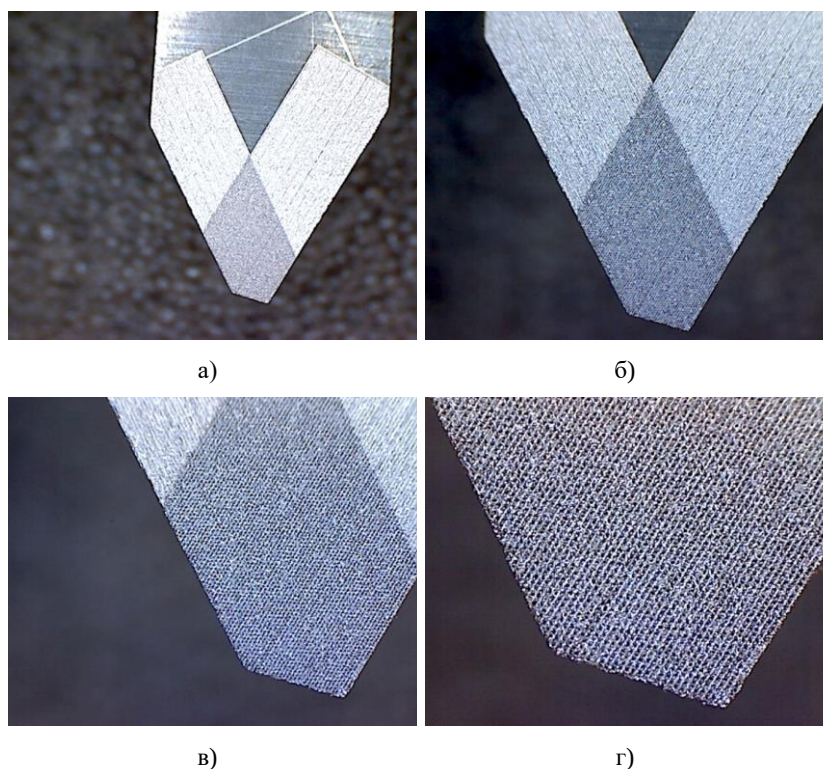


Рисунок 4.12.2 – Общий вид режущей пластины из материала BK8 после лазерной абляции при увеличении: а) $\times 20$; б) $\times 50$; в) $\times 100$; г) $\times 200$

Промышленные испытания проводились на базе специального токарного станка для точения коллектора ротора двигателя электроинструмента с управлением частот вращения шпинделя частотным преобразователем (рисунок 4.12.3).



Рисунок 4.12.3 – Экспериментальная установка на базе токарного станка

Обрабатываемым изделием является ротор двигателя электроинструмента, представленный на рисунке 4.12.4.

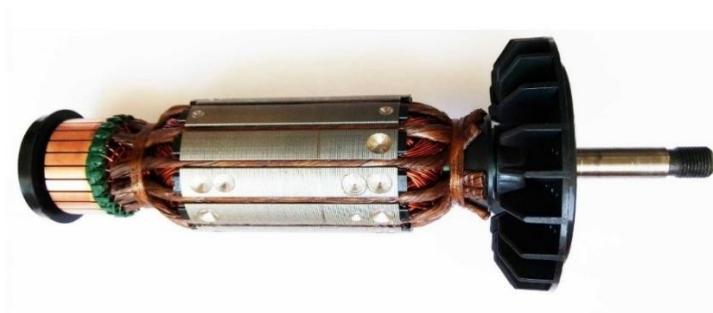


Рисунок 4.12.4 – Ротор двигателя электроинструмента

Режимы резания при проведении экспериментальных исследований на стойкость, представлены в таблице 4.12.2, материал пластин – твердый сплав ВК8, обрабатываемый материал – медь марки М1. Обработка производится без подачи СОТС.

Таблица 4.12.2 – Режимы механической обработки

№ п/п	Глубина резания h , мм	Скорость обработки V , м/мин	Подача мм/об	Время обработки $t_{обр.}$, мин
1	0,5	250	0,2	0,1

Поверхности режущих пластин после процесса резания были исследованы при помощи измерительного микроскопа Veeco Discovery VMS-001. Изображения режущих пластин материала ВК8 после промышленных испытаний представлен на рисунке 4.12.5.

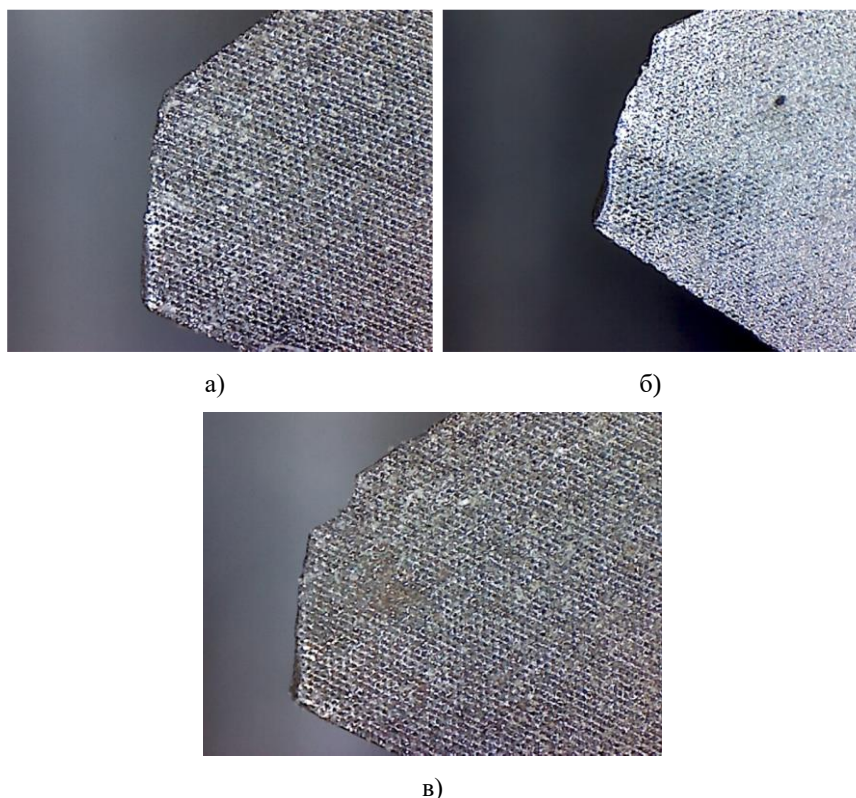


Рисунок 4.12.5 – Износ режущих пластин материала ВК8 после промышленных испытаний при увеличении $\times 200$: а – нормальный износ; б – допустимый износ; в – критический износ

На рисунке 4.12.6 представлены поверхности коллекторов роторов двигателя электроинструмента, обработанные резцами без обработки (рисунок 4.12.6б), и после лазерной абляции (рисунок 4.12.6а).

Результаты промышленных испытаний показывают, что износ по задней поверхности режущего инструмента после абляции на воздухе при обработке коллекторов на скорости $V=250$ м/мин в 3 раза меньше, чем у не обработанного образца.

Модифицирование поверхности режущего инструмента повышает стойкость инструмента, а следовательно, и общий ресурс, экономию затрат на инструмент.



Рисунок 4.12.6 – Поверхности коллекторов роторов двигателя электроинструмента: а – обработанные модифицированным инструментом; б – обработанные стандартным инструментом

4.13 Эффективность применения режущего инструмента с дискретным диффузионным покрытием и внедрение технологии нанесения локального диффузного покрытия

В качестве инструментальной базы для реализации процесса нанесения локального диффузионного покрытия на режущий инструмент в рамках настоящего исследования было применено устройство «УИВ-2». Принцип действия данного устройства основан на последовательном протекании следующих процессов в атмосферном воздухе: диссоциация молекул газов, их ионизация в зоне коронного разряда и осаждение активированных частиц на поверхность за счёт сил электростатического притяжения (электронное сродство).

Конструктивно устройство «УИВ-2» состоит из блока питания высокого напряжения и сопла-ионизатора. Его технические характеристики (максимальная потребляемая мощность – 60 *кВА*, габариты – 240×190×100 *мм*) обеспечивают возможность компактного размещения как в составе станков с ЧПУ, так и на универсальном оборудовании.

Основной целью данного раздела является комплексный анализ предложенного технологического подхода к формированию дискретных диффузионных покрытий на режущих инструментах и деталях сложной конфигурации. Анализ проводится с учётом структурных, функциональных и эксплуатационных аспектов, а также оценки экономической целесообразности и перспектив внедрения.

Сущность предлагаемого метода заключается в создании упорядоченной системы локализованных зон покрытия, разделенных интервалами с минимальным или отсутствующим материалом покрытия, что в диссертационной работе определяется как локальное (ячеистое) диффузионное покрытие. Для реализации этого процесса достаточно электромеханического модуля оборудования, обеспечивающего ротационные (угловые) перемещения и линейные возвратно-поступательные движения. В экспериментальной части исследования был задействован электромеханический блок от электроэрозионного станка модели «Эльфа», что подчеркивает адаптивность метода к существующим производственным ресурсам без необходимости в специализированном оборудовании. Принципиальная схема опытной установки «УИВ-2», предназначенной для нанесения такого покрытия на основе указанного станка, иллюстрируется на рисунке 4.13.1, что позволяет визуализировать интеграцию компонентов и оценить конструктивную простоту системы.

Одним из наиболее значимых достоинств данной установки является способность генерировать локальное диффузионное покрытие, сочетающее оптимальные характеристики пластичности и твердости, при этом сохраняя исходные геометрические параметры обрабатываемой поверхности. В частности, метод исключает изменение линейных размеров, включая радиус режущей кромки

г, который, напротив, возрастает в случае применения альтернативных технологий, таких как ионно-плазменное нанесение. Это преимущество особенно актуально для прецизионных инструментов, где даже минимальные отклонения в геометрии могут привести к снижению точности обработки и ускоренному износу.

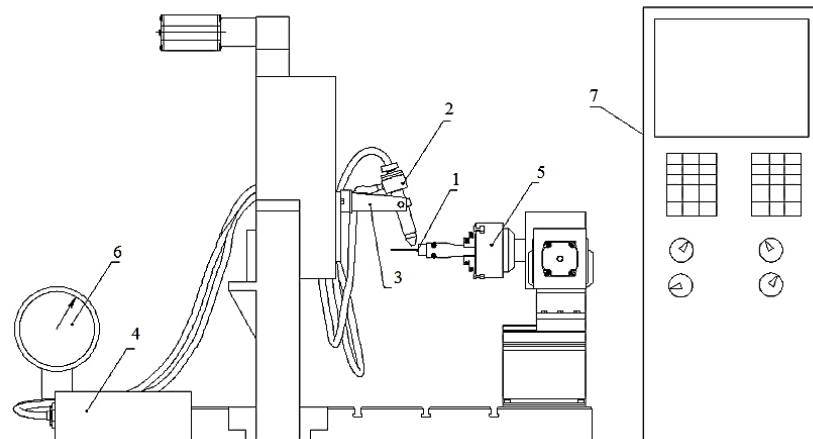


Рисунок 4.13.1 – Принципиальная схема установка «УИВ» для нанесения локального диффузионного покрытия на базе электроэрозионного станка «Эльфа»: 1 - образец; 2 - сопло-ионизатор «УИВ-2»; 3 - крепежная стойка; 4 - блок питания для устройства «УИВ-2»; 5 - шпиндель для закрепления образца; 6 - манометр; 7 - система управления оснащена ЧПУ

Разработанный технологический цикл нанесения локального диффузионного покрытия демонстрирует высокую гибкость, позволяя модифицировать сложнопрофильные структуры режущего инструмента как на этапе первичной подготовки, так и после операций переточки. Более того, метод применим к деталям с нестандартной геометрией, что расширяет его сферу использования за пределы инструментального производства и интегрирует в области высокотехнологичного машиностроения. В процессе формирования покрытия возникает нестехиометрическая поликристаллическая структура, которая эффективно минимизирует термомеханические напряжения в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом. Это, в свою очередь, способствует замедлению процессов износа режущего инструмента, как подтверждается

исследованиями [96, 119-122], подчеркивающими роль структурных особенностей в повышении стойкости.

Для достижения максимальной эффективности эксплуатации режущего инструмента с таким покрытием необходимо оптимизировать комбинацию ключевых параметров резания: подачу S , скорость V и стойкость инструмента $T_{ст}$, определяемую временем до его замены. Эффективность в оптимальном режиме представляет собой верхнюю границу достижимых результатов по выбранному критерию, где на практике доминирует показатель производительности обработки деталей. В контексте анализа предлагается оценить производительность режущего инструмента с локальным диффузионным покрытием конкретно при механической обработке шлицевых валов, что позволит количественно обосновать преимущества метода в реальных производственных сценариях.

Для определения производительности обработки валов был выбран твердосплавный режущий инструмент – червячная фреза модуль №1, паспорт 5, для сравнения был взят исходный инструмент без покрытия. Обрабатываемый материал – партия шлицевых валов из конструкционной углеродистой стали 45. Испытания проводились на станке с ЧПУ в цехе №2 АО «ЗАВОД «ФИОЛЕНТ».

В результате промышленных испытаний, стойкость фрезы увеличилась в 2 раза, до установленного критерия износа и позволила обработать 700 валов вместо 350 по действующему технологическому процессу, что подтверждено техническим актом, представленным в Приложение Г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана и научно обоснована технология повышения износостойкости металлорежущего инструмента на основе комбинированного модифицирования поверхности, включающей лазерную абляцию и нанесение дискретного диффузионного покрытия. Технология обеспечивает увеличение стойкости инструмента на 20–30% по сравнению с покрытием TiN и на 50–70% по сравнению с пластинами без покрытия.

2. Проведен анализ состояния проблемы и современных методов повышения износостойкости режущего инструмента, выявлены ограничения традиционных подходов (CVD, PVD, термическая обработка) и обоснована перспективность комбинированного подхода, сочетающего микро- и наноструктурирование поверхности с формированием оксидных пленок.

3. Установлены механизмы воздействия лазерной абляции на материалы P6M5 и T15K6: формирование микро- и наноструктур с двойной шероховатостью, изменение химического состава (образование оксидов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , FeO , Co_3O_4 , CoO и нитридов), повышение гидрофобности (увеличение угла смачивания для P6M5 до 184% для воды и 222% для масла И30) и упрочнение за счет перераспределения дефектов структуры.

4. Разработаны математические модели, описывающие влияние параметров лазерной абляции (мощность, частота, количество проходов) и диффузионного покрытия (давление, ток) на показатели эффективности обработки, включая глубину обработки, шероховатость (R_a , R_z), микротвердость и износостойкость. Модели учитывают синергетический эффект, позволяя прогнозировать оптимальные режимы обработки для P6M5 и T15K6, что подтверждено снижением износа на 75,6–88,3% и наростообразования на 70,4–85,2% по сравнению с необработанными пластинами.

5. Подтверждено, что дискретное диффузионное покрытие обеспечивает сглаживание микрорельефа (снижение R_a для P6M5 до 0,134–0,254 мкм, для T15K6 до 0,499–0,611 мкм), формирование стехиометрической оксидной пленки и

остаточных сжимающих напряжений, что снижает трение и повышает коррозионную стойкость.

6. Экспериментально подтверждено, что лазерно-диффузионная обработка существенно снижает износ по задней поверхности ($H_z=0,057$ мм при $V=50$ м/мин, $H_z=0,0211$ мм при $V=70$ м/мин, на 75,6–88,3% ниже, чем у пластин без покрытия) и предотвращает наростообразование (0,056–0,0486 мм, снижение на 70,4–85,2%), превосходя покрытие TiN на 16,3–25% по износу и 20,6–88,8% по устойчивости к наросту. оказано, что синергетический эффект данной технологии обусловлен сочетанием двух ключевых факторов: микроструктурирования поверхности после лазерной абляции, снижающего адгезию обрабатываемого материала, и формирования оксидной пленки, уменьшающей трение. Это сочетание обеспечивает достигнутый высокий уровень износостойкости и стабильности эксплуатационных характеристик инструмента.

7. Экспериментально установлено, что эффективность технологии наиболее высока для инструмента из сплава P6M5, где достигается снижение шероховатости на 60–80%, тогда как для T15K6 требуется оптимизация параметров абляции для устранения пупырчатости. Разработаны практические рекомендации для использования лазерных установок «Fmark-100 NS» и «МиниМаркер 2-20A4».

Технология комплексного модифицирования применима для промышленного производства, особенно в условиях высоких скоростей резания, обеспечивая снижение производственных затрат, повышение качества обработки.

Практическое значение работы заключается в увеличении срока службы инструмента в 2 и более раз, снижение затрат на обслуживание и закупку инструмента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абхаирова С.В. Физико-химические закономерности формирования дискретного диффузионного покрытия / С. В. Абхаирова, Е. А. Чекалова, Э. Э. Ягъяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 4(78). – С. 209-213.
2. Адаскин А.М. Современный режущий инструмент / А. М. Адаскин, П. В. Колесов.- 2011.-224 с.
3. Аметов И.Э. Термодинамические превращения в поверхностном слое углеродистой стали при лазерной абляции на воздухе / И. Э. Аметов, С. Н. Акимов, И. Д. Сефедин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 2(80). – С. 211-214. – DOI 10.34771/UZCEPU.2023.80.2.039. – EDN ENIOJT.
4. Анисимов С.И. Действие излучения большой мощности на металлы / С.И. Анисимов, Имса Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. – М.: Наука, 1970. – 273 с.
5. Антонюк В.С., Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б. Выбор параметров покрытий с дискретной структурой при упрочнении поверхности режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 3. – С. 28–39.
6. Антонюк В.С., Сорока Е.Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – № 8. – С. 8–13.
7. Балдаев Н. PVD/CVD-покрытия для деталей машин и механизмов / Н. Балдаев // Ритм машиностроения. – 2020. – № 7. – С. 24-27. – URL: <https://ritm-magazine.com/ru/magazines/2020/zhurnal-ritm-mashinostroeniya-no-7-2020#page-2728>.
8. Барабонова И.А., Раткевич Г.В., Афанасьева Л.Е. Упрочнение быстрорежущей стали с помощью лазерной закалки и лазерного отпуска // «Символ Науки», 2015. – № 10. – С. 87-89.
9. Барзов А.А. Эмиссионная технологическая диагностика / А. А. Барзов. - М.: - Машиностроение, 2005. - 384 с.

10. Бернацкий А.В. Лазерное поверхностное легирование стальных изделий (Обзор) / А. В. Бернацкий // Сварочное производство. – 2013. – № 12. – С. 3-10.
11. Бобылёв Э.Э. Повышение эксплуатационных свойств режущего твердосплавного инструмента за счет диффузионной металлизации из среды легкоплавких жидкометаллических расплавов: дис. ... канд. техн. наук / Э. Э. Бобылёв. – Краснодар, 2019. – 180 с.
12. Богодухов С.И. Влияние термической обработки на прочность и износостойкость сплава Т15К6 / С. И. Богодухов, Е. С. Козик, Е. В. Свиденко // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82. – № 11. – С. 27–31.
13. Вакс Е.Д., Лебёдкин И.Ф., Миленский М.Н., Сапрыкин Л.Г., Толокнов А.В. Резание металлов излучением мощных волоконных лазеров – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 352 с.
14. Вейко В.П., Петров А. А., Самохвалов А.А. Введение в лазерные технологии. Опорный конспект лекций по курсу «Лазерные технологии» под редакцией В.П. Вейко.: - СПб: Университет ИТМО, 2018. — 161 с.
15. Верещака А.С. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А. С. Верещака. – М. : Машиностроение, 1993. – 336 с.
16. Воробьева Г.А., Складнова Е.Е., Леонов А.Ф., Ерофеев В.К. Инструментальные материалы. – СПб.: Политехника, 2005. – 260 с.
17. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1985 – 304 с.
18. Григорьев С.Н., Волосова М.А., Боровский В.Г. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя керамического инструмента для повышения его работоспособности при обработке закаленных сталей // Станки и инструмент. – № 9, 2005, С 14 - 19.

19. Григорьянц А.Г. Лазерная обработка неметаллических материалов: учебное пособие / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов. – М.: Высшая школа, 1988. Книга 4 – 191 с.
20. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А. Г. Григорьянц, И. Н. Шиганов, А. И. Мисюров; под ред. А. Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2006. – 664 с.
21. Гуляев А.П. Металловедение / А. П. Гуляев.– 6-е изд. – М.: Металлургия. – 1986. – 544 с.
22. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы: учебник / Ю. М. Зубарев. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Лань, 2022. — 304 с.
23. Износостойкие покрытия режущих инструментов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.myshared.ru/slide/1375608/23>.
24. Капцов Н.А. Коронный разряд и его применение в электрофильтрах / Н. А. Капцов. - М.: Библиотека ХНЦ центральное хранилище основной фонд, 1947. - 157 с.
25. Кириллов А.К. Применение системы экологически безопасного сухого резания при обработке конструкционных материалов [Текст] А. К. Кириллов, М. Н. Лазарева // Справочник. Инженерный журнал. – 2013. № 1.– С. 11–16.
26. Климков Ю.М., Майоров В.С., Хорошев М.В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2014.– 108 с.
27. Коденко Н. Технология лазерной маркировки материалов [Текст] / Н. Коденко, А. Иванов // Новая электроника России: сб. конференции. – 2010. – С. 31-39.
28. Коротаев А.Д. Наноструктурные и нанокompозитные сверхтвердые покрытия Текст. / А.Д. Коротаев; В.Ю. Мошков, С.В: Овчинников; Ю.П. Пинжин, В.М. Савостиков, А.Н. Тюменцев, //Физическая мезомеханика. – 2005.-Т.8. -№ 5. С. 103 -106.
29. Костюк Г.И. Проверка адекватности теоретического определения размера зерна при нанесении многокомпонентного покрытия на режущий

твердосплавный инструмент / Г. И. Костюк, О. О. Бруяка, И. В. Кантемир // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2014. – № 64. – С. 120–128.

30. Костюк Г.И. Физико-технические основы нанесения покрытий, ионной имплантации и ионного легирования, лазерной обработки и упрочнения, комбинированных технологий [Текст]: в 2 кн. / Г. И. Костюк. – К.: Изд-во АИНУ, 2002. – 1030 с.

31. Костюк Г.И. Нанотехнологии: теория, эксперимент, техника, перспективы [Текст]: моногр. / Г.И. Костюк. – К.: Изд. центр Междунар. академии наук и инновац. технологий, 2012. – 648 с.

32. Кудинов В.В. Нанесение покрытий напылением: теория, технология и оборудование / В. В. Кудинов, Г. В. Бобров. - М.: Металлургия, 1992. - 304 с.

33. Кужненко А.А. Разработка оксидно-нитридных многослойных покрытий для режущего твердосплавного инструмента: дис. ... канд. техн. наук / А.А. Кужненко. – Москва, 2016. – 186 с.

34. Леб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах / Л. Леб. - М. - Л.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1950. - 211 с.

35. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Механизмы поглощения и диссипации энергии в веществе, под общей редакцией Вейко В.П. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2005. – 84 с.

36. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Часть II. Лазерный нагрев и разрушение материалов. Учебное пособие. Под общей редакцией В.П. Вейко – СПб: НИУ ИТМО, 2014. –181с.

37. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1982. – 302с.

38. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В., Сорока Е.Б., Липинская Н.В. О снижении остаточных напряжений в вакуум-плазменных покрытиях // Пробл. прочности. - 2001. - №4. - С. 62-67.

39. Ляшенко Б.А., Сорока Е.Б., Рутковский А.В., Липинская Н.В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // Пробл. прочности. - 2002. - №4. - С. 119-125.
40. Маркова Е.А. Износостойкие покрытия для режущих инструментов: пособие для студентов специальности 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства» / Е. А. Маркова, О. К. Яцкевич. – Минск: БНТУ, 2021. – 50 с.
41. Мустафаев Э.С. Повышение эксплуатационных показателей концевых твердосплавных микрофрез за счет плазменно-пучковой модификации поверхности: дис. ... канд. техн. наук / Э.С. Мустафаев. – Москва, 2023. – 134 с.
42. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ / Н. К. Мышкин, М. И. Петроковцев, – ФИЗМАТЛИТ. – 2007. – 355 с.
43. Некрасов, Б.В. Основы общей химии / Б.В. Некрасов. - М.: Изд-во «Химия», 1973. - 1т. 656 с.
44. Николаев Л.А. Физическая химия / Л. А. Николаев, В. А. Тулупов. – М.: Высшая школа. 1967. – 466 с.
45. Новиков И.И. Физическая механика реальных материалов / И. И. Новиков, В. А. Ермишкин. - М.: Наука, 2004. - 310 с.
46. Новиков И.И. Физическая механика реальных материалов / И. И. Новиков, В. А. Ермишкин. - М.: Наука, 2004. - 310 с.
47. Парфенов В.А. Лазерная микрообработка материалов : Учебное пособие / В. А. Парфенов. Санкт-Петербург : СПбГЭТУ ЛЭТИ , 2011. 59 с.
48. Патент № 2812820 С1 Российская Федерация, МПК В23В 49/00, В23Q 17/09. Способ измерения температурных и силовых параметров процесса резания при сверлении : № 2023120361 : заявл. 02.08.2023 : опубл. 02.02.2024 / В. В. Скакун, Р. М. Джемалядинов, И. Э. Теминдаров, И. Б. Д. о. Сефедин. – EDN QVEDDU.
49. Патент № 2852004 С1 Российская Федерация, МПК С21D 9/22, С21D 1/09, В82В 3/00. Способ лазерной обработки металлорежущего инструмента: № 2025113065 : заявл. 16.05.2025 : опубл. 02.12.2025 / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягьяев, Э. Д. Умеров. – EDN QVEDDU.

50. Польшер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение. – 1984. – 245 с.
51. Польшер Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польшер, Ф. Майсснер. – М.: Машиностроение. – 1984. – 245 с.
52. Прутки и полосы из быстрорежущей стали. Технические условия. ГОСТ 19265-73 [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://docs.cntd.ru/document/1200009073>.
53. Регель В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В. Р. Регель, А. И. Слуцкер, Э. Е. Томашевский. - М.: Наука, 1974. - 535 с.
54. Резание материалов. Режущий инструмент: учеб. пособие/ В.М. Кишуров, Н.К. Криони, В.В. Постнов, П.П. Черников – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 492 с.
55. Рыжкин А.А. Физические основы обработки материалов резанием: учебное пособие / А.А. Рыжкин, М. М. Климов. – Ростов-на-Дону, Издательский центр ДГТУ, 1996. - 138 с.
56. Sandvik Coromant. Технология обработки металлов резанием: учебное пособие. – М.: Sandvik Coromant, 2017. – 391 с.
57. Свойства неорганических соединений. Справочник / Ефимов А. И., Белорукова Л. П., Василькова И. В., Чечев В. П. – Л.: Химия, 1983. – С. 226-279.
58. Свойства неорганических соединений. Справочник / Ефимов А.И., Белорукова Л.П., Василькова И.В., Чечев В.П. – Л.: Химия, 1983. – 392 с.
59. Свойства элементов / под ред. Г.В. Самсонова. – М.: Металлургия, 1976. – Ч. 1. Физические свойства. – 598 с.
60. Сефедин И.Д. Анализ длин волн лазерного излучения для эффективной обработки шлифовальных кругов на керамической связке / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягьяев, А. И. Алиев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2020. – № 4(70). – С. 310-316.
61. Сефедин И.Д. Модификация поверхности титана и его сплавов лазерным излучением / И. Д. Сефедин, С. Н. Акимов, И. Э. Аметов // Ученые

записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 1(83). – С. 278-282. – DOI 10.34771/UZCEPU.2024.83.1.046. – EDN VH DJUO.

62. Сефедин И.Д. Современные методы повышения износостойкости металлорежущих инструментов / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягьяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2025. – № 3(89). – С. 331-337. – EDN RFKPMТ.

63. Сефедин И.Д. Создание микро- и наноструктур на поверхности металлорежущего инструмента из стали Р6М5 для повышения износостойкости методом лазерной абляции / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягьяев, И. Э. Аметов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 3(85). – С. 213-219. – EDN KDYQOT.

64. Сефедин И.Д. Создание микро- и наноструктур на поверхности твердого сплава Т15К6 для повышения износостойкости методом лазерной абляции / И. Д. Сефедин, Э. Э. Ягьяев, И. Э. Аметов // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 4(86). – С. 296-301. – EDN QOBZWO.

65. Сизов С.В. Повышение работоспособности твердосплавного режущего инструмента путем импульсной лазерной обработки многослойного покрытия: дис. ... канд. техн. наук / С.В. Сизов. – Ульяновск, 2019. – 156 с.

66. Солоненко В.Г., Рыжкин А.А. Резание металлов и режущие инструменты: учебное пособие. – Инфа-М., Высшее образование, 2014. – 416 с. 2.

67. Сплавы твердые спеченные. Марки, ГОСТ 3882-74 (ИСО 513-75) [Электронный ресурс]. - Режим доступа : <https://docs.cntd.ru/document/1200009338>.

68. Степанкин И.Н. Влияние лазерной модификации на эксплуатационные характеристики стали Р6М5 / Степанкин И.Н., Верещагина Л.С., Поздняков Е.П., Девойно О.Г., Веремей П.В. // «Технологии материалов». // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2015. - № 1. – С. 19-26.

69. Сутягин А.Н. Повышение ресурса концевой инструмента за счет применения нанокompозитных PVD-покрытий при обработке титановых сплавов в

авиастроении [Текст] А. Н. Сутягин, С. А. Сайкин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. № 5. – С. 41–44.

70. Табаков В.П., Рандин А.В. Применение импульсной лазерной обработки для повышения работоспособности быстрорежущего инструмента с многослойными покрытиями // Упрочняющие технологии и покрытия. – № 11, 2005. - С. 18-21.

71. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В., Чихранов А.В. Износостойкие покрытия для поверхностного упрочнения режущих инструментов. – № 8, 2005. - С. 21-26.

72. Табаков В.П. Технологические методы нанесения износостойких покрытий режущего инструмента : учебное пособие / В. П. Табаков, Д. И. Сагитов. – Ульяновск : УлГТУ, 2014. – 90 с.

73. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н. В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

74. Теория резания: учеб./П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич – 2 изд., испр. и доп. – Мн.: Новое знание, 2006 – 512 с.

75. Фазовые и структурные превращения при лазерном нагреве стали. I. Влияние исходной структуры / В.Д. Садовский, Т.И. Табатчикова, А.В. Салохин, М.М. Малыш // ФММ. -1982. Т.53, Вып.1. - С. 88-94.

76. Федоров С.В. Технология лазерного удаления износостойких покрытий с поверхности металлорежущего инструмента из твердых сплавов [Текст] С. В. Федоров, А. В. Кабанов, Е. А. Остриков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. № 12. – С. 40–43.

77. Френкель Я.И. Собр. тр. в 9 т. – Кинетическая теория жидкости: т. 3. – М.Л., АН СССР, 1959. – 422 с.

78. Хасуй А. Техника напыления. М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.

79. Чекалова Е.А. Повышение износостойкости инструмента и основные аспекты проблемы экологии в машиностроении / Е. А. Чекалова // Технология машиностроения. – 2005. – №1. – С. 26 - 27.

80. Чекалова Е.А. Проблемы экологии в металлообрабатывающем производстве / Е. А. Чекалова // Вестник машиностроения. - 2005. - № 1. - С. 69 - 70.

81. Чекалова Е.А. Способ формирования износостойкого покрытия на поверхности металлической детали / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов, Р. Д. Соломатина // Патент № 2548835 РФ на изобретение, МПК C23C8/36. Опубликовано 24.03.2015г. Патентообладатель: Чекалова Е. А. Приоритет изобретения 01.11.2013г.

82. Чекалова Е.А. Устройство для получения озонированного воздуха при резании / Е. А. Чекалова, В. Д. Гурин // Патент 2279962 РФ на изобретение, МПК B23Q011/10/ Опубликовано 20.07.2006.

83. Чекалова Е.А. Экологически чистая газодинамическая обработка поверхности детали с целью повышения качества / Е. А. Чекалова, П. Д. Чекалов // Журнал известия МГТУ «МАМИ». - 2013. - №1 (15) т.2. - С. 119 -123.

84. Чекалова Е.А. Поверхностное упрочнение инструментальных и конструкционных материалов нанесением дискретного диффузионного покрытия: дис. ... д-р. техн. наук / Е.А. Чекалова. – Москва, 2018. – 282 с.

85. Чекалова Е.А. Экологически чистая технология в машиностроении / Е. А. Чекалова, Н. Н. Ромина // ИТО: инструмент–технология–оборудование.- 2008. – № 3. – С. 12 – 16.

86. Шматов А.А. Формирование композиционной структуры при термогидродинамической обработке твердого сплава [Текст] А. А. Шматов // Упрочняющие технологии и покрытия.– 2013. № 2. – С. 33–39.

87. Ягьяев Э.Э. Повышение режущей способности лезвий бритвенного прибора за счет обработки лазером наносекундной длительности / Э. Э. Ягьяев // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2023. – № 1(79). – С. 270-275.

88. Barmina E.V. et al. Laser Alloying of Co Nanorods and Al Nanoparticles in a Liquid //ChemPhysChem. – 2017. – V. 18. – №. 9. – P. 1069-1073.

89. Carpenne E., Shinn M., Zhou P. Ultrafast laser-induced microstructural transformations [Текст] / E. Carpenne, M. Shinn, P. Zhou // Applied Surface Science. - 2017. - Vol. 417. - P. 19-28. - DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.143.
90. Cha T.-G., Yi J. W., Moon M.-W., Lee K.-R., and Kim H.-Y., «Nanoscale patterning of microtextured surfaces to control superhydrophobic robustness.» Langmuir, vol. 26, no. 11, pp. 8319–8326, 2010.
91. Chekalova E.A. Increased Material Durability with a Discrete Oxide Layer / E. A. Chekalova, A. V. Zhuravlev // Key Engineering Materials. – 2022, 910 KEM. – p. 604–609.
92. Eberle G., Jefimovs K., Wegener K. Characterisation of thermal influences after laser processing polycrystalline diamond composites using long to ultrashort pulse durations // Precision Engineering. 2015. Vol. 39. P. 16-24.
93. Fang, S.; Pérez, V.; Salán, N.; Baehre, D.; Llanes, L. Surface Patterning of Cemented Carbides by Means of Nanosecond Laser. Mater. Manuf. Process. 2019, 35, 123–129.
94. Generation of core–shell nanoparticles Al₂Ti by laser ablation in liquid for hydrogen storage / A. A. Serkov, E. V. Barmina, A. V. Simakin, P. G. Kuzmin, V. V. Voronov, G. A. Shafeev // Appl. Surf. Sci. – 2015. – V. 348. – P. 71–74.
95. Gräf, S.; Kunz, C.; Müller, F.A. Formation and Properties of Laser-Induced Periodic Surface Structures on Different Glasses. Material 2017, 10, 933.
96. Grigoryants A.G. Laser surfacing of nickel-based composite war-resisting coatings reinforced with tungsten carbide Grigoryants A.G., Stavertiy A.Y., Bazaleeva K.O., Yudina T.Y., Smirnova N.A., Tretyakov R.S., Misyurov A.I. /Welding International. 2017. T. 31. № 1. pp. 52-57.
97. Gualtieri E. Synergy of laser texturing and DLC coatings for cutting tools / E. Gualtieri, A. Borghi, N. M. Pugno // Wear. — 2021. — Vol. 476-477. — Art. 203656. — DOI: 10.1016/j.wear.2021.203656.
98. Gualtieri E., Borghi A., Pugno N. M. Synergy of laser texturing and DLC coatings for cutting tools [Текст] / E. Gualtieri, A. Borghi, N. M. Pugno // Wear. - 2021. - Vol. 476-477. - Art. 203656. - DOI: 10.1016/j.wear.2021.203656.

99. Hamad A.H. Effects of different laser pulse regimes (nanosecond, picosecond and femtosecond) on the ablation of materials for production of nanoparticles in liquid solution / High Energy and Short Pulse Lasers, 2016/9/7 - 305-325
100. Jiang T., Zhao Q. (2020) Lung Tumors Laser Ablation. In: Pacella C., Jiang T., Mauri G. (eds) Image-guided Laser Ablation. Springer, Cham pp 107-115 https://doi.org/10.1007/978-3-030-21748-8_12
101. Kalpakjian, S.; Schmid, S.R.; Schmind, S.R.; Sekar, K.S.V. Manufacturing Engineering and Technology, 7th ed.; Pearson Education: London, UK, 2014
102. Kazaryan M.A On one mechanism of light ablation of nanostructures / Kazaryan M.A., Lidskii V.V., Sachkov V.I. / Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering 13. Cep. «International Conference on Atomic and Molecular Pulsed Lasers XIII» 2018. pp. 106-141.
103. Kemell M., Färm E., Santala E., Ritala M., and Leskelä M., «Transparent superhydrophobic surfaces by self-assembly of hydrophobic monolayers on nanostructured surfaces» Nature, pp. 3–4, 2005.
104. Kudryashov, S.I.; Nguyen, L.V.; Kirilenko, D.A.; Brunkov, P.N.; Rudenko, A.A.; Busleev, N.; Saraeva, I.N.; Nastulyavichus, A.A.; Ionin, A.A.; Tolordava, E.R.; et al. Large-scale Laser Fabrication of Anti-Fouling Si Surface Nanosheet Arrays via Nanoplasmonic Ablative Self-organization in Liquid CS₂ Tracked by Sulfur Dopant. ACS Appl. Nano Mater. 2018, 1, 2461–2468.
105. Lam J. et al. Dynamical study of bubble expansion following laser ablation in liquids //Applied Physics Letters. – 2016. – V. 108. – №. 7. – P. 074104.
106. Lang V., Rank A., Lasagni A. F. Large Area One-Step Fabrication of Three-Level Multiple-Scaled Micro and Nanostructured Nickel Sleeves for Roll-to-Roll Hot Embossing //Advanced Engineering Materials. – 2017. – V. 19. – №. 8. – P. 1700126.
107. Otake, S.; Ohfuji, H.; Okuchi, T.; Kagi, H.; Sumiya, H.; Irifune, T. Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: A comparative study with single crystal diamond. Diam. Relat. Mater. 2009, 18, 877–880.

108. Pacella C. M. Mauri G. History of Laser Ablation. /Springer nature Switzerland AG 2020 / Image-guided Laser Ablation 2020/01/01 pp.1-5. DOI - 10.1007/978-3-030-21748-8
109. Pacella, M.; John, M.G.J.S.; Dolatabadi, N.; Badiee, A. Microhardness and wear behaviour of polycrystalline diamond after warm laser shock processing with and without coating. *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 2019, 82, 215–226.
110. Serkov, A.A.; Barmina, E.V.; Simakin, A.V.; Kuzmin, P.G.; Voronov, V.V.; Shafeev, G.A. Generation of core–shell nanoparticles Al-Ti by laser ablation in liquid for hydrogen storage. *Appl. Surf. Sci.* 2015, 348, 71–74.
111. Shafeev, Georgy. Laser Ablation in Flowing Liquid. / *Laser Ablation in Liquids* / 2012. pp.549-572 / DOI 10.1201/b11623-12.
112. Shi Q., Gu D., Xia M., Cao S., Rong T. Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites // *Optics & Laser Technology*. 2016. Vol. 84. P. 9-22.
113. Siddiqui, A.A.; Dubey, A.K. Recent trends in laser cladding and surface alloying. *Opt. Laser Technol.* 2020, 134, 106-619.
114. Solutions, I.L. Femtosecond Laser Micromachining: A Back-to-Basics Primer. 2012. Available online: <https://www.industrial-lasers.com/micromachining/article/16485321/femtosecond-laser-micromachining-a-backtobasics-primer>.
115. Streubel, R.; Barcikowski, S.; Gökce, B. Continuous multigram nanoparticle synthesis by high-power, high-repetition-rate ultrafast laser ablation in liquids. *Opt. Lett.* 2016, 41, 1486–1489
116. Ukar, E.; Lamikiz, A.; Martínez, S.; Tabernero, I.; de Lacalle, L.N.L. Roughness prediction on laser polished surfaces. *J. Mater. Process. Technol.* 2012, 212, 1305–1313.
117. Varel H, Ashkenasi D, Rosenfeld A et al. Micromachining of quartz with ultrashort laser pulses / *Appl Phys*, 1997. – A 65: P. 367–373

118. Vázquez-Martínez, J.M.; Del Sol, I.; Batista, M.; Vidal, S.R.F.; Hernandez, P.M.; Salguero, J. Experimental Study of Laser Texturing Processes on the Lubricant Retention of Carbide (WC-Co) Surfaces. *Key Eng. Mater.* 2019, 813, 55–61. [CrossRef]
119. Weingärtner E. Wegener K. Dold C. Laser Ablation. / *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 2015 pp.1-4 / DOI 10.1007/978-3-642-35950-7_6474-4.
120. Wu Z., Deng J., Xing Y., Cheng H., Zhao J. Effect of surface texturing on friction properties of WC/Co cemented carbide // *Materials & Design*. 2012. Vol. 41. P. 142-149.
121. Xin Liu, Yu Liu, Lei Li, Yuan Tian, Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Volume 84, 2019, 104987.
122. Yagyaev Elmar and Akimov Seran. (2020). Improvement of high-speed steel cutting tool production technology using the method of nanostructure generation by laser ablation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 889. 012031. 10.1088/1757-899X/889/1/012031.
123. Yagyaev, E. Modification of the surface of a reconditioned cutting tool via laser ablation / E. Yagyaev, S. Akimov // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1037 MSF. – P. 558-563.
124. Yan Z. Chrisey, D. / Pulsed laser ablation in liquid for micro-nanostructure generation / *Journal of Photochemistry and Photobiology C Photochemistry Reviews* 13(3):204–223, 2012/09/01 / DOI: 10.1016/j.jphotochemrev.2012.04.004
125. Yilbas B. S. Laser surface texturing for improved adhesion of PVD coatings / B. S. Yilbas, H. Ali, N. Al-Aqeeli // *Surface and Coatings Technology*. — 2019. — Vol. 357. — P. 638-647. — DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.10.052.
126. Yilbas B. S., Ali H., Al-Aqeeli N. Laser surface texturing for improved adhesion of PVD coatings [Текст] / B. S. Yilbas, H. Ali, N. Al-Aqeeli // *Surface and Coatings Technology*. - 2019. - Vol. 357. - P. 638-647. - DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.10.052.

127. Zhang X., Chen G., Wang X. Residual stress regulation in laser-ablated tool steels for thermal fatigue resistance [Текст] / X. Zhang, G. Chen, X. Wang // Materials & Design. - 2020. - Vol. 185. - Art. 108235. - DOI: 10.1016/j.matdes.2019.108235.

128. Zhang, X.; Ni, D.; Xiao, B.; Andrä, H.; Gan, W.; Hofmann, M.; Ma, Z. Determination of macroscopic and microscopic residual stresses in friction stir welded metal matrix composites via neutron diffraction. Acta Mater. 2015, 87, 161–173.

129. Zou T., Li W., Zhang L. Advanced surface engineering of cutting tools using hybrid laser-coating technology [Текст] / T. Zou, W. Li, L. Zhang // Journal of Materials Processing Technology. - 2022. - Vol. 299. - Art. 117348. - DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2021.117348.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Патент на изобретение «Способ лазерной обработки металлорежущего инструмента»



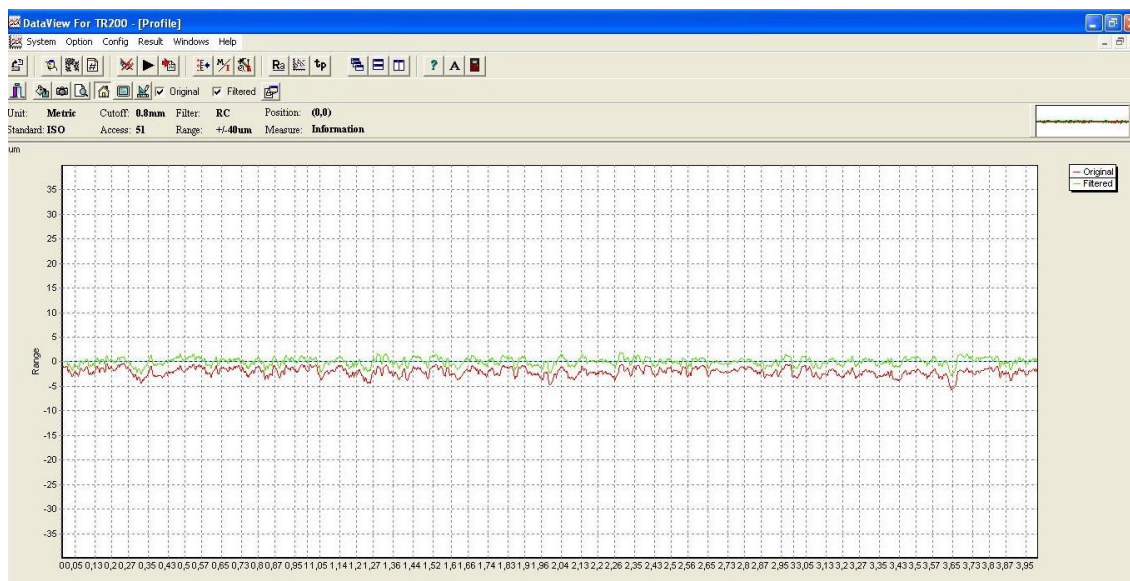
ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Патент на изобретение «Способ измерения температурных и силовых параметров процесса резания при сверлении»



ПРИЛОЖЕНИЕ В

а)



б)



в)

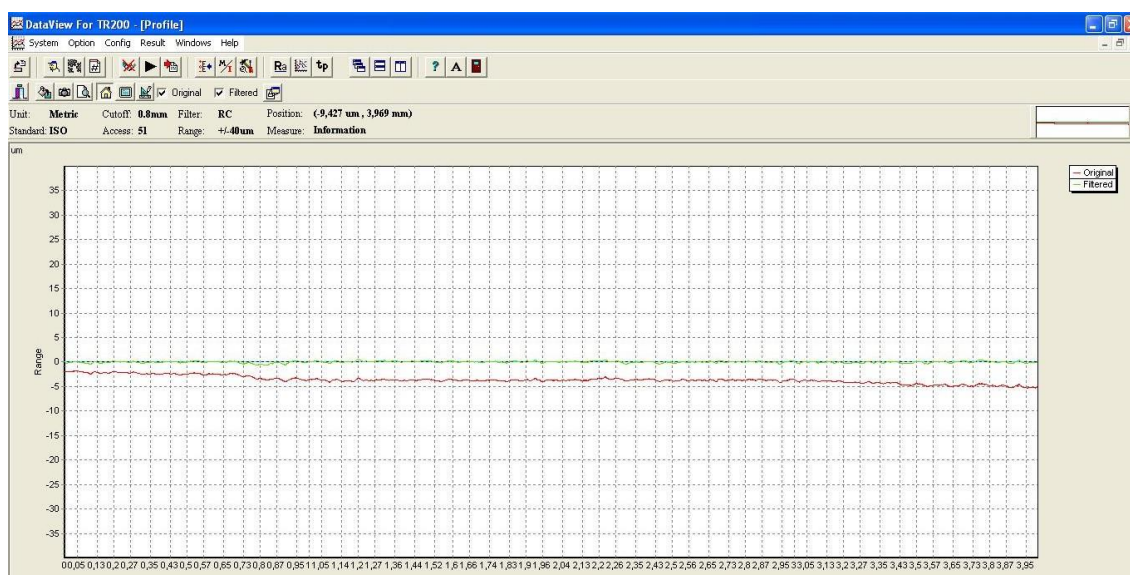
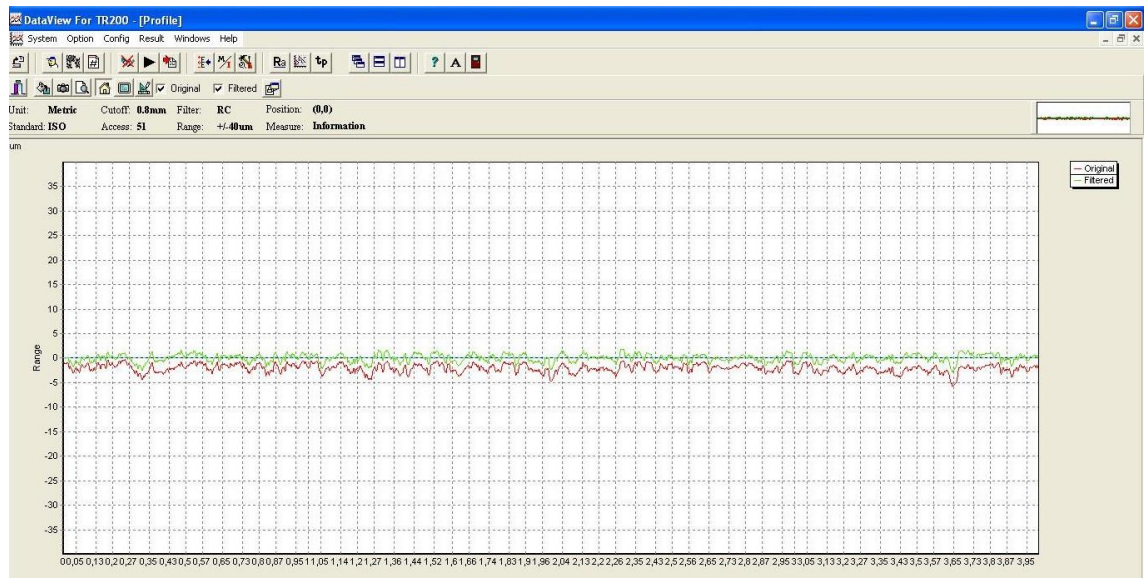
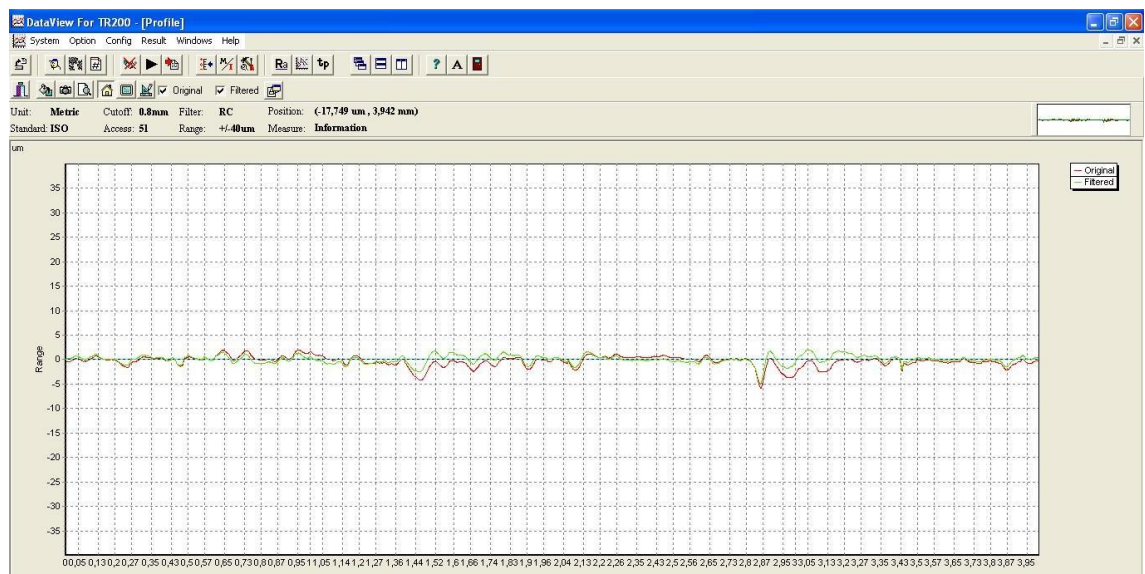


Рисунок В.1 – Графики профиля режущей пластины Р6М5 №1: а) – без обработки; б) – после лазерной абляции; в) – после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия.

а)



б)



в)

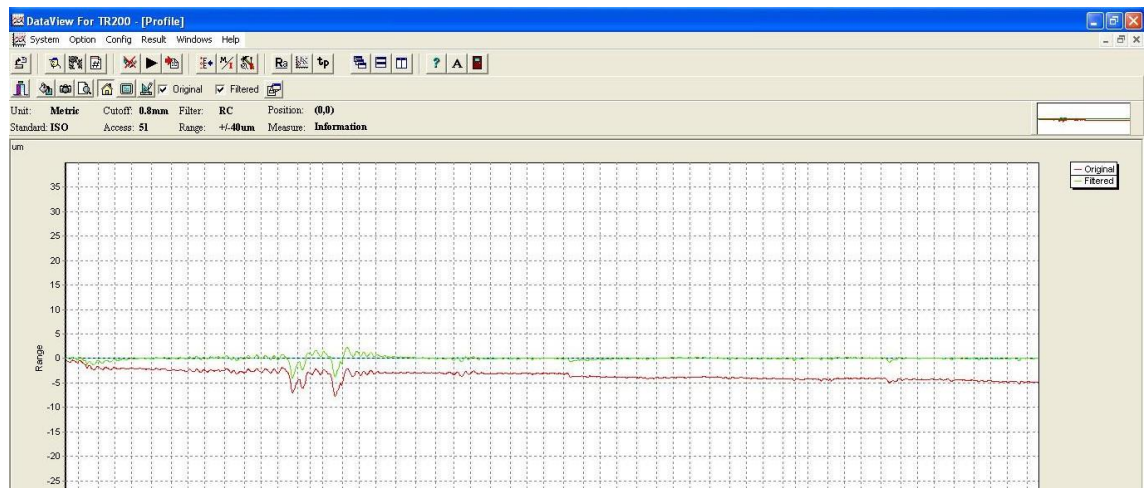
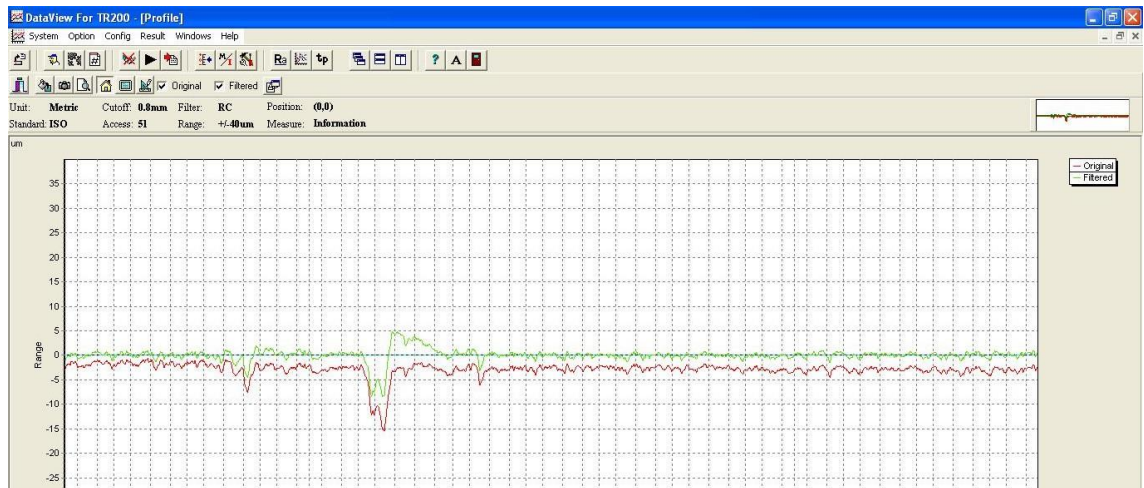
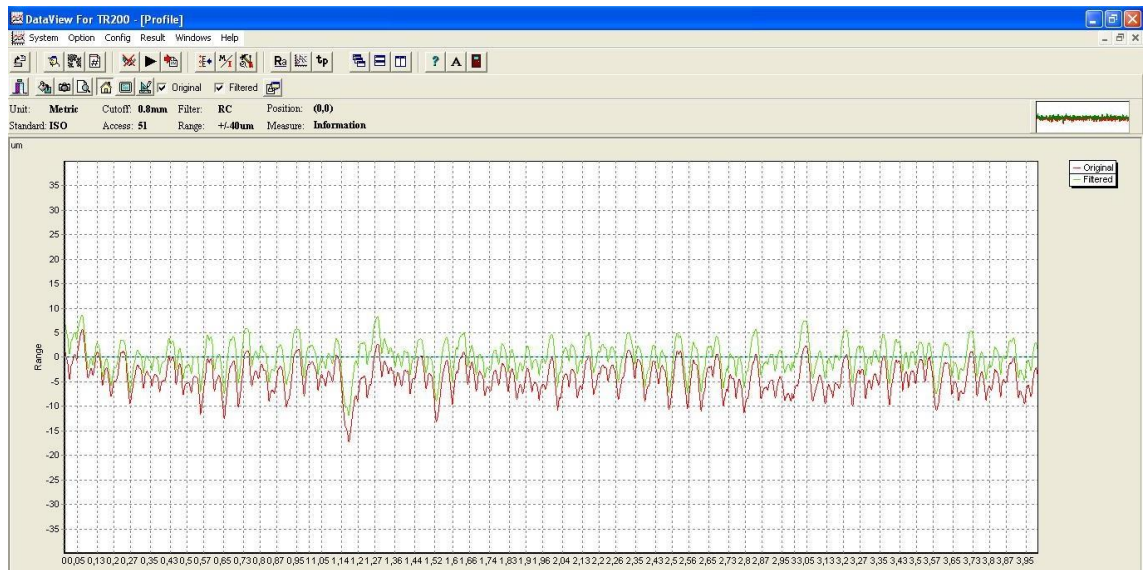


Рисунок В.2 – Графики профиля режущей пластины Р6М5 №3: а) – без обработки; б) – после лазерной абляции; в) – после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия.

а)



б)



в)

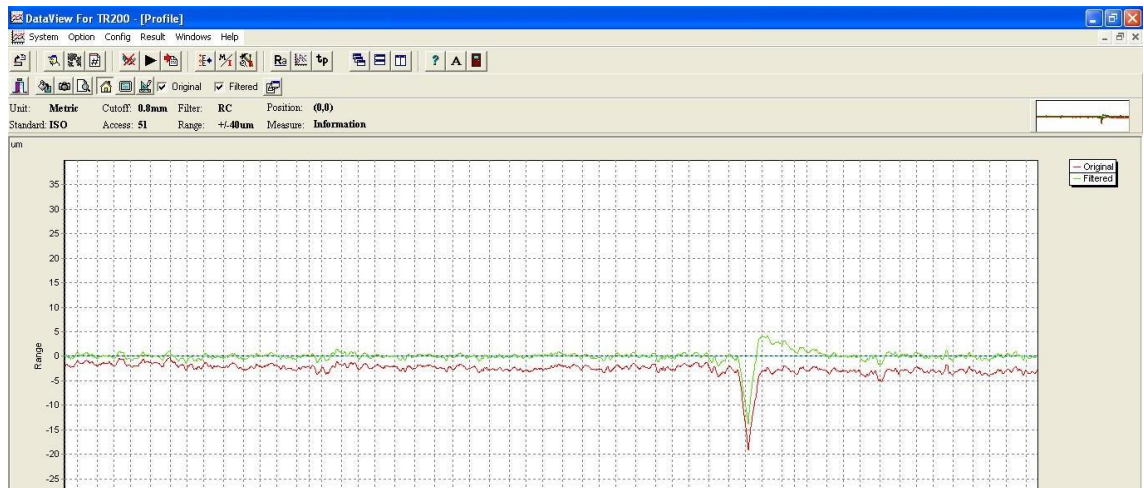
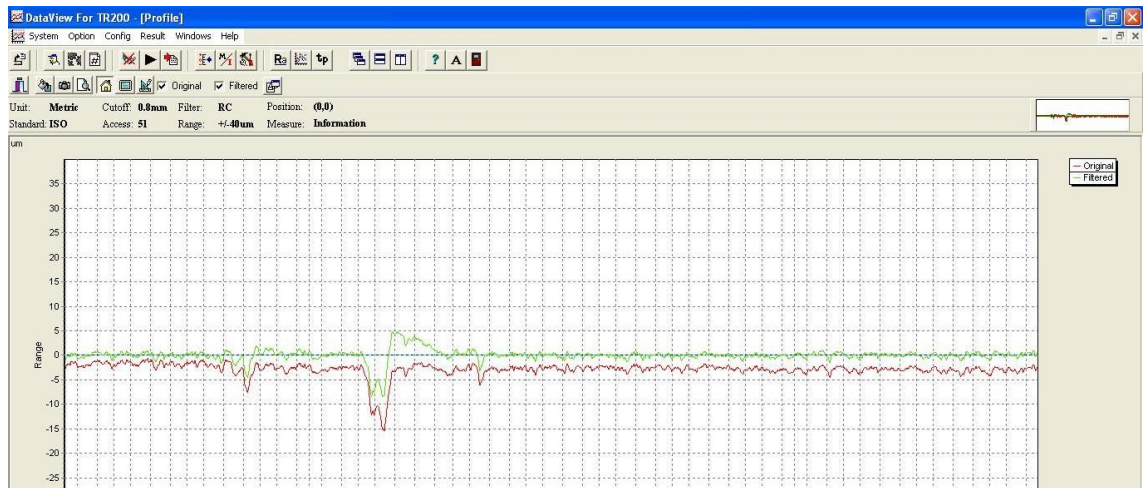
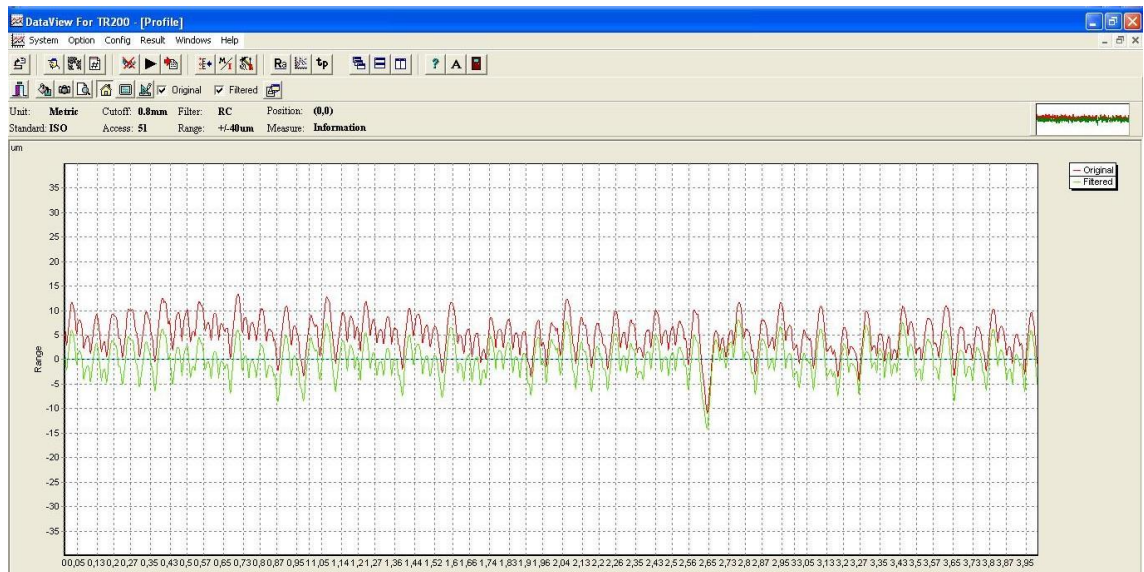


Рисунок В.3 – Графики профиля режущей пластины Т15К6 №5: а) – без обработки; б) – после лазерной абляции; в) – после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия.

а)



б)



в)

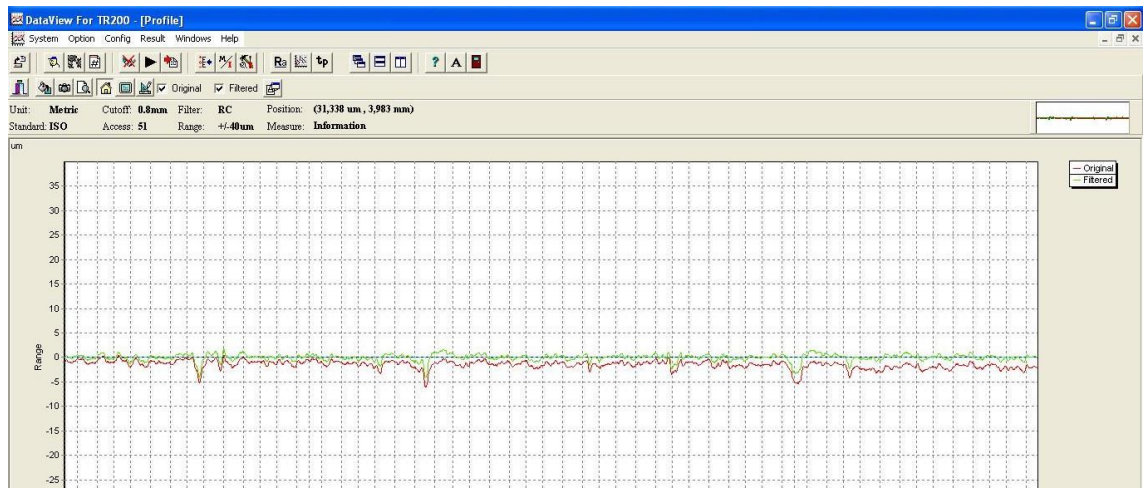


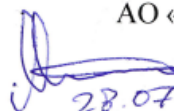
Рисунок В.4 – Графики профиля режущей пластины Т15К6 №6: а) – без обработки; б) – после лазерной абляции; в) – после лазерной абляции с последующим нанесением дискретного диффузионного покрытия.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ

ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР

АО «ЗАВОД «ФИОЛЕНТ»


В.М. Мануйленко
28.07.21.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ №18

О проведении испытаний инструмента после нанесения диффузионно-дискретного упрочнения

Комиссией в составе: начальника БТПП А.В. Сальникова, Зам. Главного технолога- Начальника ТБ-1 ОГТ В.Н. Фирсова, Мастера цеха №2 В.В. Кретова, Технолога цеха №2 А.В. Селезнева согласно РГИ №66 провела испытания червячной фрезы модуль1, паспорт №5 *Р-5243* .

УСТАНОВЛЕНО:

1. Фреза отстояла до переточки 700 валов. По действующему техпроцессу стойкость фрезы 350шт.

ВЫВОДЫ и РЕШЕНИЯ:

1. Стойкость фрезы увеличилась в 2раза.

РЕКОМЕНДАЦИИ:

1. СПП: Заточить фрезу и передать в цех№2 для дальнейшей работы.
Срок: 30.07.21г.
2. Цех№2: продолжить эксплуатацию фрезы с фиксацией количества нарезанных валов до следующей заточки.

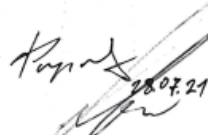
Начальник БТПП



А.В. Сальников

Зам. Главного технолога-

Начальник ТБ-1 ОГТ

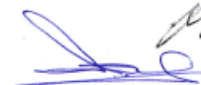

28.07.21

В.Н. Фирсов

Мастер цеха №2

В.В Кретов

Технолог цеха №2



А.В Селезнев

СОГЛАСОВАНО:

Главный технолог


28.07.2021

С.В.Бороздин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

«УТВЕРЖДАЮ»

Технический директор

ООО «Производственная компания

«Техно Импат Юг»

Хохряков Ю.Г.

2025 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования
Сефедин Исмаила Бей Диявер оглу

Комиссия под председательством главного технолога ООО «ПК ТПЮГ» составила настоящий акт о том, что сотрудником кафедры «Электромеханика и сварка» ГБОУВО РК «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» Сефедин И.Д. проведено внедрение в производство методики комплексной обработки поверхности металлорежущего инструмента с целью повышения его износостойкости.

На предприятии была апробирована и внедрена разработанная в рамках диссертационного исследования технология модифицирования поверхности металлорежущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 для фрезерования корпусов из алюминиевого сплава Д16. Для токарной обработки валов на станках с ЧПУ применены модифицированные пластины из твердого сплава ВК8, Т15К6.

В результате производственных испытаний модифицированного инструмента в условиях производства при обработке были получены следующие результаты по сравнению с серийным инструментом с традиционным покрытием и без него:

- повышение стойкости инструмента в 2.0-2.5 раза;
- снижение износа по задней поверхности режущей пластины на 60-75 %;
- рост производительности процесса на 15 % за счет увеличения стойкости и сокращения простоя оборудования на замену и переналадку инструмента;
- снижение процента бракованных деталей на операциях чистовой обработки на 1.5-2 %, за счет стабильности процесса резания и качества обработанной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная и внедренная комбинированная технология модифицирования поверхности металлорежущего инструмента является эффективной и подтверждает результаты лабораторных исследований. Технология позволяет существенно повысить эксплуатационные характеристики инструмента, снизить издержки на инструментальное обеспечение и повысить общую эффективность механообрабатывающего производства.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения технологии в условиях ООО «ПК ТПЮГ», оцененный в 300 000 рублей.

Настоящий акт составлен в двух экземплярах, имеющих одинаковую юридическую силу.

Настоящий акт не является основанием для предъявления взаимных финансовых претензий.

Технический директор
ООО «ПК ТПЮГ»



/Ю.Г. Хохряков/