

На правах рукописи



Сефедин Исмаил Бей Дилявер оглу

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ МЕТАЛЛОРЕЖУЩЕГО
ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ
ЕГО РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Симферополь – 2026

Работа выполнена в Государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Республики Крым «Крымский инженерно-педагогический университет имени Февзи Якубова» (ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова) на кафедре «Электромеханика и сварка».

Научный руководитель:

Ягьяев Эльмар Энверович,
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Корсунов Константин Анатольевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Луганский государственный
университет имени Владимира Даля»,
заведующий кафедрой «Физика»
(г. Луганск)

Лебедев Валерий Александрович,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет», профессор
кафедры «Технология машиностроения»
(г. Ростов-на-Дону)

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Московский
политехнический университет»
(г. Москва)

Защита диссертации состоится «10» апреля 2026 г. в 14⁰⁰, на заседании диссертационного совета 24.2.393.01 при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Гоголя, д.14, актовый зал.

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

Автореферат разослан «___» _____20__ г.

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

E-mail: nipokintelitsa@mail.sevsu.ru

Тел.: 8 (8692) 41-77-41 (доб. 1307)

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д-р техн. наук, профессор

Н.И. Покинтелица

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 финансовых затрат. При этом 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, 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 к расширению 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 научных 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.

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, обоснованных 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: твёрдостью, шероховатостью, микрорельефом, химическим составом, температурой и толщиной 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;
- в увеличении срока службы инструмента в 2 и более раз;
- в снижении производственных затрат на инструмент, уменьшении времени на переналадку станков, сокращении затрат на покупку новых инструментов, снижении объема отходов и уменьшении потребности в ресурсах для производства новых изделий;
- в разработке технологических рекомендаций по получению микро- и наноструктур на режущей поверхности металлорежущего инструмента лазерным излучением, обеспечивающих оптимальное качество обрабатываемой поверхности;
- в разработке и внедрении технологии повышения износостойкости металлорежущего инструмента на основе комплексного модифицирования его поверхности лазерной абляцией и нанесением дискретного диффузионного покрытия с использованием в образовательном процессе ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова.

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 [1–3] автором сформулированы выбор направления, цели и задачи исследований; в работе [2-3] рассмотрен процесс обработки поверхности быстрорежущей стали Р6М5 и твердого сплава Т15К6 методом лазерной абляции; в работе [4] определено изменение структуры поверхности титана и некоторых его сплавов под действием лазерного излучения небольшой мощности; в публикации [5] 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 [6] авторский вклад составляет 50%, в патенте [7] авторский вклад составляет 30%.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния параметров процесса лазерной обработки поверхности и нанесения дискретного диффузионного покрытия, характеризующие взаимосвязи между входными и выходными параметрами с учетом изменения микроструктуры поверхности и химического состава, позволяющего прогнозировать поведение технологической системы при изменении режимов обработки.

2. Комплекс технических решений повышения износостойкости металлорежущего инструмента на основе взаимодействия лазерного излучения и коронного разряда с обрабатываемым материалом.

3. Результаты экспериментальных исследований повышения стойкости на инструментах из быстрорежущей стали Р6М5 и твердых сплавах Т15К6, ВК8 в процессе комплексного модифицирования поверхности.

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. Часть экспериментальных исследований проводилась при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонд содействия инновациям, Договор № 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», (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» (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 9 работах. В рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК, опубликовано 5 статей, 1 статья проиндексирована в наукометрической базе Scopus, получено 2 патента России на изобретения.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования в контексте современных требований машиностроительного производства. Отмечено, что износ

режущего инструмента является ключевой причиной снижения качества продукции и роста себестоимости продукции. Подчеркнута необходимость разработки инновационных технологий повышения износостойкости инструмента, особенно в условиях крупносерийного и массового производства. Определены цель и задачи исследования, объект и предмет, научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу современных подходов к повышению износостойкости металлорежущего инструмента. Рассмотрены материалы, используемые для режущего инструмента (быстрорежущие стали, твердые сплавы, керамика, кубический нитрид бора, алмаз), их свойства и особенности эксплуатации. Описаны основные механизмы износа инструмента: абразивный, адгезионный, диффузионный, химический и термомеханический. Дается критический обзор существующих методов повышения износостойкости, включая термическую обработку, легирование, нанесение покрытий (CVD и PVD) и пластическую деформацию. Выявлены недостатки традиционных методов, такие как хрупкость покрытий и высокая стоимость оборудования.

На основе анализа установлена необходимость разработки новой технологии, сочетающей высокую эффективность, низкую себестоимость и экологическую безопасность с повышением износостойкости инструмента.

Во второй главе диссертации рассматриваются теоретические основы лазерной абляции и формирования дискретных диффузионных покрытий.

На процесс лазерной обработки влияют параметры лазера и свойства материала (например, поглощение, время релаксации электронов, связующее вещество и размер зерна). Ключевым параметром лазерной обработки является плотность мощности, которая представляет собой количество энергии, излучаемой на площадь материала и выраженное в уравнении (1):

$$E_{\text{пор}} = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

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

Режущий инструмент изготавливают из материалов разных классов, поэтому целесообразно проведение исследования в области взаимодействия лазерного излучения с металлами и неметаллами.

При поглощении существует сильная зависимость поглощения света от длины волны, что поясняется зависимостью (2):

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad (2)$$

где λ – длина волны лазерного луча, мкм ; k – теплопроводность, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$.

Из анализа данных по поглощательной способности материалов установлено, что лазерные установки, работающие на длине волн в диапазоне 488...1064 нм можно применить для абляции твердых и тугоплавких материалов с учетом максимального поглощения (рисунок 1).

Разработана схема взаимосвязей параметров, определяющих технологический процесс получения структур методом лазерной абляции с последующим дискретным диффузионным покрытием (рисунок 2). Показано, 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.

Описаны физико-химические закономерности формирования дискретных диффузионных покрытий, их влияние на адгезию и механическую прочность поверхности.

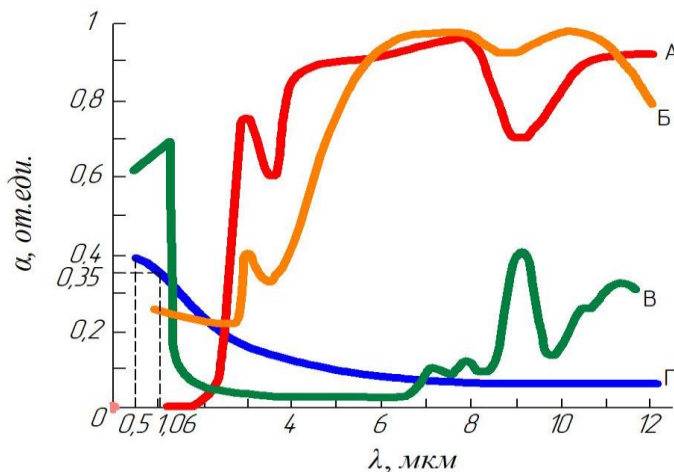


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента поглощения α лазерного излучения от длины волны λ для материалов: А – стекло, Б – глиноземная керамика, В – кремний, Г – железо

Представлены технологические аспекты диффузионного насыщения поверхности. Модель локального покрытия, показывает, где положительная корона усиливает хемосорбционную активность воздуха, вызывает селективное окисление поверхности и блокирует процессы азотирования.

Дискретное диффузионное покрытие рассмотрено как объемный модификатор свойств инструментального материала. Полученная ячеистая структура покрытия обеспечивает снижение эффективного модуля упругости композиции «покрытие–основа»,

улучшение условий релаксации напряжений и повышение стойкости к распространению трещин.

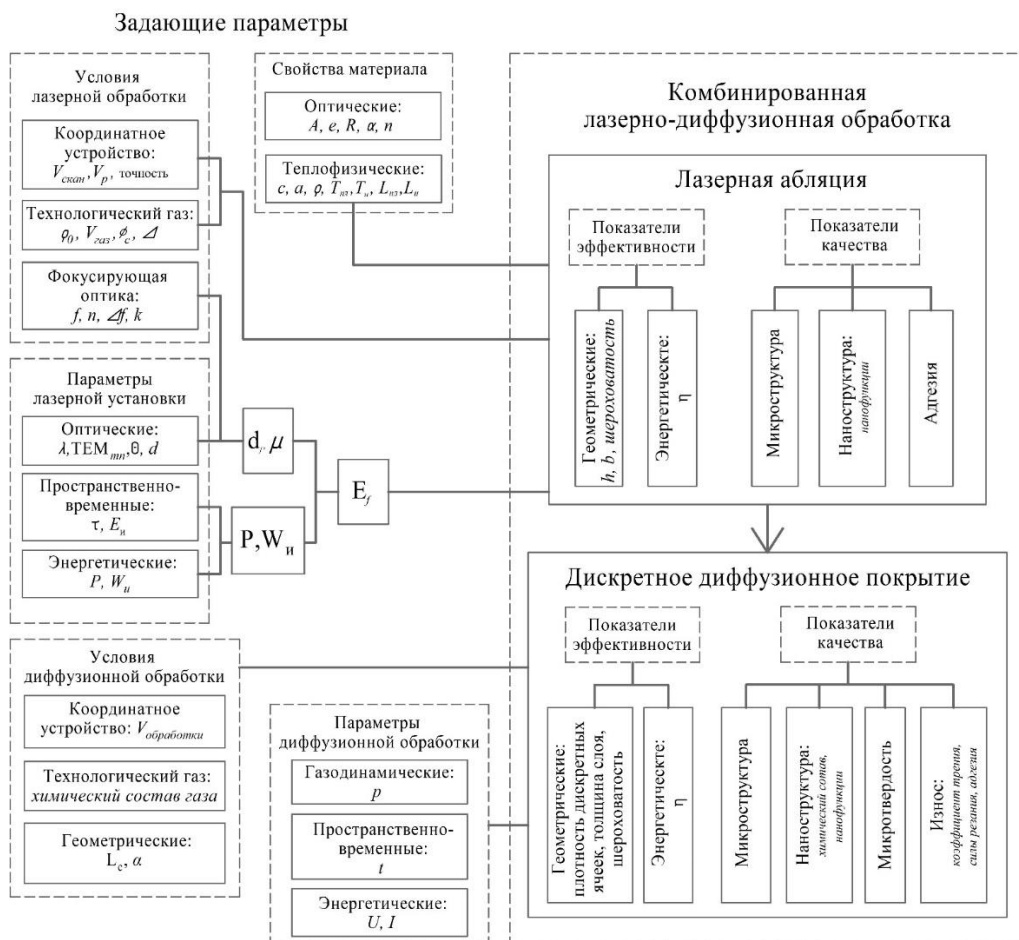


Рисунок 2 – Схема комплексного модифицирования рабочей поверхности лазерной абляцией и дискретным диффузионным покрытием

Выполненное теоретическое моделирование показывает, что локальный характер покрытия сохраняет пластичность основы, компенсирует разницу коэффициентов термического расширения и снижает склонность к упругим прогибам. Установлены взаимосвязи между технологическими параметрами и эксплуатационными характеристиками инструмента.

Теоретически обоснована эффективность комбинированного подхода, включающего лазерную абляцию и нанесение дискретных покрытий, для улучшения свойств режущего инструмента.

Лазерная абляция позволяет формировать заданную микроструктуру поверхности с контролируемой шероховатостью и сжимающими остаточными напряжениями, улучшая адгезию последующих покрытий (рисунок 3), что способствует увеличению площади контакта и улучшению адгезионных свойств покрытия.

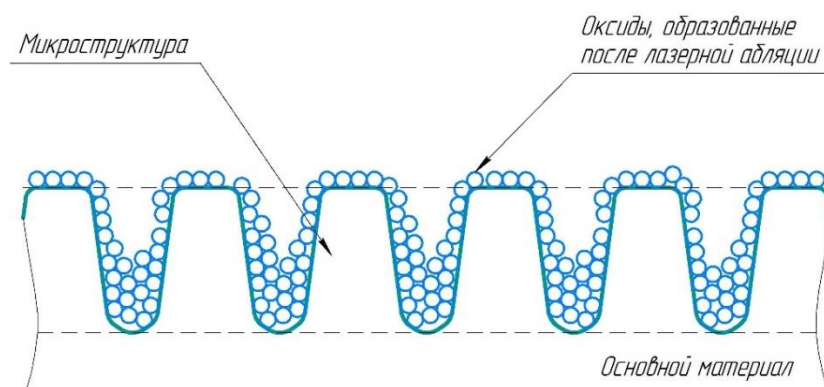


Рисунок 3 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции

Локальный лазерный нагрев приводит 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.

Диффузионные покрытия обеспечивают локальное упрочнение поверхности, снижение эффективного модуля упругости и повышение трещиностойкости, которая эффективно перераспределяет и релаксирует напряжения (рисунок 4). Диффузионные покрытия из оксидов активно формируются на предварительно обработанной поверхности лазерной абляцией. Оксиды, образованные после диффузионного насыщения, заполняют микронеровности и увеличивают толщину покрытия.

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 5). 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.

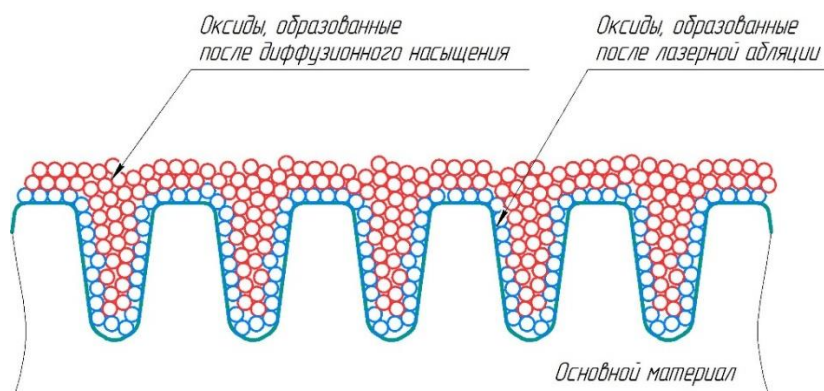


Рисунок 4 – Схема образования микроструктуры и оксидов на поверхности инструмента после лазерной абляции, с последующим образованием оксидов после диффузионного насыщения

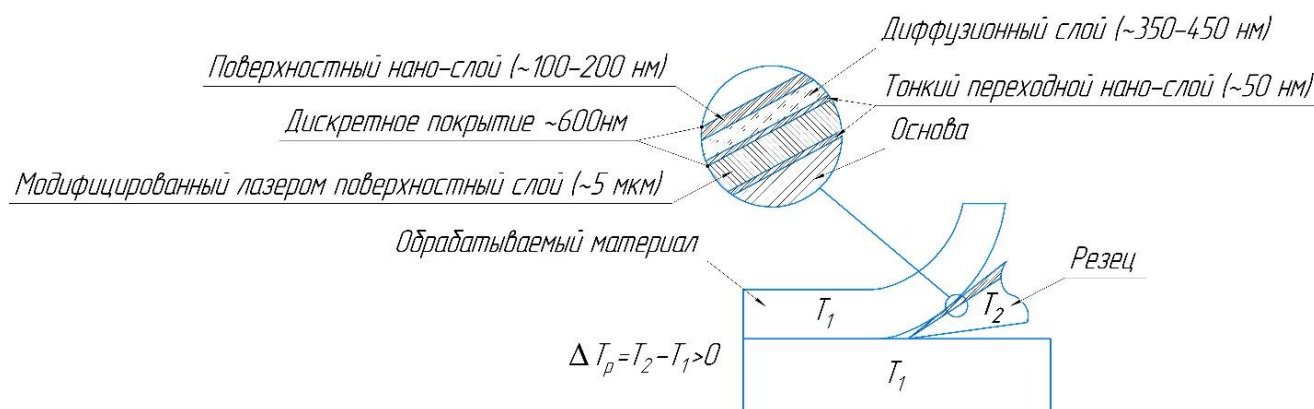


Рисунок 5 – Структура комбинированного покрытия

Дискретное диффузионное покрытие, нанесенное на подготовленную лазером поверхность, имеет ряд преимуществ перед сплошными покрытиями.

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 параметры обработки: плотность дискретных ячеек покрытия на уровне 60...70 % и соотношение мощности лазера к скорости обработки.

Ожидаемыми ключевыми результатами исследования являются снижение коэффициента трения до показателей 0,15–0,25 μ , увеличение рабочих температур и уменьшение износа инструмента с лазерно-диффузионным покрытием.

Третья глава посвящена моделированию процессов, происходящих на поверхности инструмента при лазерной абляции и нанесении покрытий. Разработаны модели, описывающие влияние параметров лазерной обработки на работоспособность и качество поверхности. Проведен термодинамический анализ превращений в поверхностном слое инструментальных сталей, а также моделирование теплообмена и напряженно-деформированного состояния системы «покрытие-основа».

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.

Технологические процессы лазерной обработки связаны в первую очередь с локальным нагревом, передачей электромагнитной волны в вещество. Данные механизмы нагрева хорошо описываются тепловой моделью.

С целью обнажения зерен, а также создания микроструктур, необходимо определить пороговую плотность мощности в фокальной плоскости $E_f^{\text{пор}}$ (Bm/m^2), необходимую для нагревания поверхности до заданной критической температуры T (K) в импульсном режиме, определяемую по формуле (3):

$$E_{f\text{имп}}^{\text{пор}} = \frac{(T - T_n)k\sqrt{\pi}}{2(1-R)\sqrt{a\tau}}, \quad (3)$$

где T_n – начальная температура, K ; k – теплопроводность, $Bm/m \cdot K$; $A = e = 1 - R$ – поглощательная (при $\lambda = 1,06$ мкм); a – температуропроводность, m^2/c ; τ – длительность импульса, c .

Подставляя теплофизические и оптические параметры химических элементов режущего инструмента, вычислили значения $E_f^{\text{пор}}$ при применении технологического лазера с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм.

Исходя из формулы (4), определили необходимую мощность лазерной установки для разрушения вещества в фокальной плоскости излучения единицы площади обрабатываемого материала:

$$P = E_f^{\text{пор}} \times S, \quad (4)$$

где S – площадь лазерного пятна, m^2 .

Расчетные значения необходимой мощности лазерного излучения для обработки железа ($P \approx 0,4$ Вт), вольфрама ($P \approx 0,5$ Вт), титана ($P \approx 0,2$ Вт).

Подбор температурного режима, и, следовательно, работы лазера, теоретическим путем, может оптимизировать процесс создания новых функций поверхности режущего инструмента. С ростом температуры поверхностного слоя в сплавах железа с углеродом выше 300 K и до 1000 K могут происходить взаимодействия атомов железа с кислородом и образованием ряда оксидов и карбида железа, взаимодействия карбида железа с кислородом и образованием оксидов металла и оксидов углерода.

Изменение энергии Гиббса, которое характеризует вероятность направления той или иной химической реакции, рассчитывается по формуле (5):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (5)$$

где G – энергия Гиббса, Дж/моль; S – энтропия, Дж/моль·К.

Константа равновесия химического процесса связана с изменением энергии Гиббса по формуле (6):

$$\Delta G = -RT \cdot \ln K^{рав}, \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль·К.

Расчетные данные изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса химических реакций, протекающих в инструментальных сталях при температурах 400...1000 К, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Изменения энтальпии, энтропии и энергии Гиббса химических реакций, протекающих в инструментальных сталях при температурах 400...1000 К

№ п/п	Уравнения реакций	ΔH , кДж	ΔS , Дж/моль·К	ΔG , кДж
1	$2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$	-528...-511	-137	-473...-373
2	$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	-1119...-1107	-345	-981...-762
3	$3\text{Fe} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C}$	27...48	21	19...27
4	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C} + 2\text{O}_2\uparrow$	1143...1170	366	997...804
5	$\text{Fe}_3\text{C} + 2,5\text{O}_2\uparrow = 3\text{FeO} + \text{CO}_2\uparrow$	-427...-411	-223	-338...-188
6	$\text{Fe}_3\text{C} + 2,5\text{O}_2\uparrow = \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}\uparrow$	-748...-727	-276	-638...-451

На основе анализа напряженно-деформированного состояния в системе «покрытие–основа» (рисунок 6) определена зависимость концентрации напряжений от плотности покрытия и обоснованы критерии выбора его оптимальных геометрических параметров для минимизации износа. Предложенная модель позволяет количественно оценить шаг и площадь дискретных участков покрытия, обеспечивающие максимальную адгезионную прочность и ресурс инструмента.

Моделирование позволило установить оптимальные параметры технологических процессов, обеспечивающие высокую износостойкость и качество поверхности.

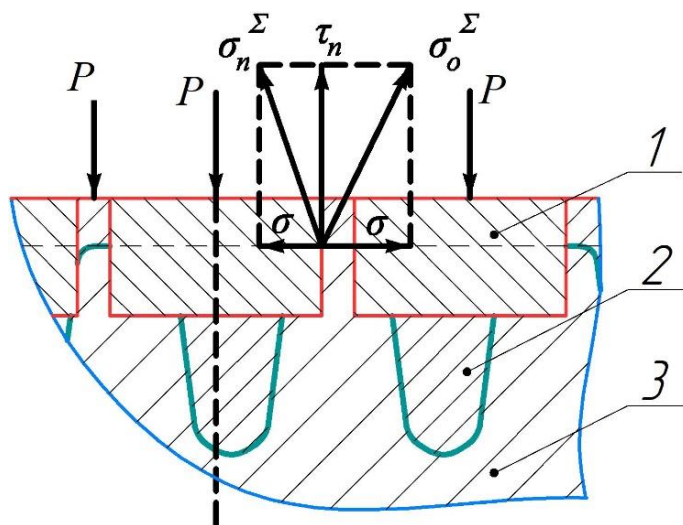


Рисунок 6 – Схема распределения напряжений в точке на границе «покрытие–основа»: 1 – дискретное покрытие; 2 – лазерно-модифицированный слой; 3 – основа

В четвертой главе описаны разработанные методы экспериментальных исследований и проведены комплексные исследования по влиянию комбинированной обработки на свойства поверхности режущих инструментов из быстрорежущей стали и твердых сплавов.

Разработана технология повышения износостойкости инструмента. Представлены методы лазерной абляции на установках «FMark-100 NS» (рисунок 7) и MiniMarker 220A4, а также нанесение дискретно-диффузионных покрытий на экспериментальной установке (рисунок 8). Изучены технологические факторы, влияющие на качество покрытий, в том числе параметры лазерной обработки и состав покрытий. Разработаны методы оптимизации процессов на основе анализа микроструктуры и физико-механических свойств поверхности.



Рисунок 7 – Экспериментальная установка для лазерной абляции на базе волоконного иттербиевого лазера «FMark-100 NS»



Рисунок 8 – Экспериментальная установка для нанесения дискретного диффузионного покрытия

Установлено, что с увеличением мощности излучения увеличиваются глубина обработки (до 40 мкм для ВКЗМ и 9,3 мкм для Т15К6) и шероховатость поверхности Ra (до 2,25 мкм для ВКЗМ и до 8 мкм для Т15К6). Обработка в воде снижает параметры Ra до 0,8...2,2 мкм, а перекрестная обработка усиливает эффект структурирования.

Анализ изменения химического состава на поверхности режущих пластин из быстрорежущей стали и твердого сплава при облучении лазерными импульсами наносекундной длительности был проведен методом рентгенофлуоресцентного анализа с использованием энергодисперсионного спектрометра Clever C-31.

Исследования химических соединений на поверхности сплава Р6М5, показали, что чистые металлы – железо Fe, вольфрам W и молибден Mo склонны к образованию оксидов, а ванадий V и хром Cr – к образованию нитридов. При этом молибден и вольфрам образуют высшие оксиды MO_3 и WO_3 , а железо Fe – смесь оксидов в разном соотношении.

В результате процесса лазерной абляции сплава Т15К6 образуются оксиды кобальта Co, сначала Co_3O_4 , а при более высоких температурах – CoO. Карбиды вольфрама WC и титана TiC на воздухе частично трансформируются

в оксиды или нитриды, а в атмосфере азота – в нитриды.

Экспериментальные исследования демонстрируют существенное изменение углов смачивания поверхностей инструмента для сплава ВК8 и быстрорежущей стали Р6М5 при абляции.

Исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии на установке TESCAN MIRA3 позволили оценить характер изменения морфологии (рисунки 9 и 10) и химического состава поверхности режущего инструмента при облучении лазерными импульсами наносекундной длительности в различных технологических средах.

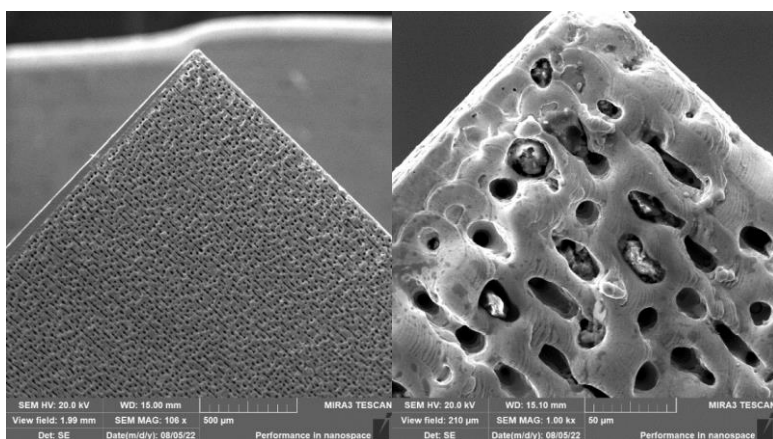


Рисунок 9 – Морфология поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 после абляции на воздухе при разном увеличении

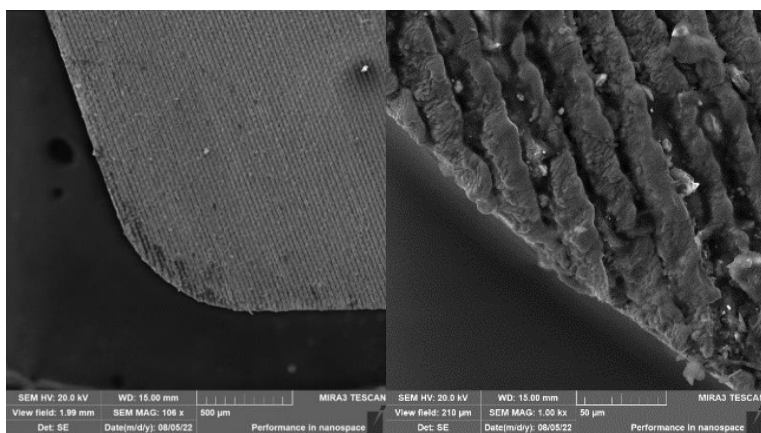


Рисунок 10 – Морфология поверхности режущего инструмента из сплава Т15К6 после абляции на воздухе при разном увеличении

На приведенных снимках были выявлены характерные морфологии поверхностей, наблюдается довольно существенное изменение геометрии поверхностного слоя.

Анализ обработанных лазером поверхностей и микрофотографирование проводились с использованием металлографического микроскопа модели 4ХВ, с увеличением исследуемых объектов в 250 и 1250 раз (таблица 2).

Данные спектрального анализа (таблица 3) поверхности сплава Р6М5 показали, что эффект максимального упрочнения достигается в зоне непосредственного воздействия лазерного излучения на поверхность материала. Повышение содержания углерода (в 4 и более раз), а также кислорода

(на порядок) отражает значительное упрочнение поверхности сплава.

Анализ поверхности сплава Т15К6 (таблица 4) указывает на образование оксида и нитрида титана, а также на уменьшение величины зерен и увеличение плотности дислокаций.

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.

Таблица 2 – Морфология поверхности пластин из стали Р6М5 после лазерной абляции на воздухе

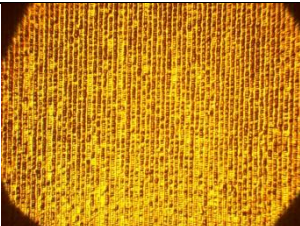
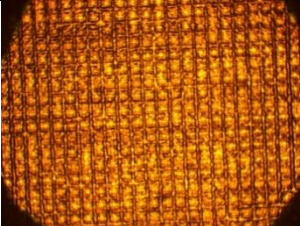
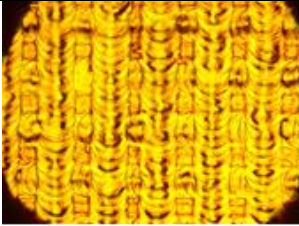
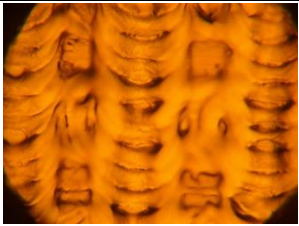
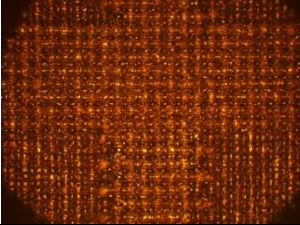
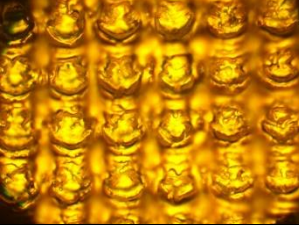
№ п/п	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×250	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×650	Морфология поверхности пластин после лазерной абляции при увеличении ×1250
1			
2			
3			

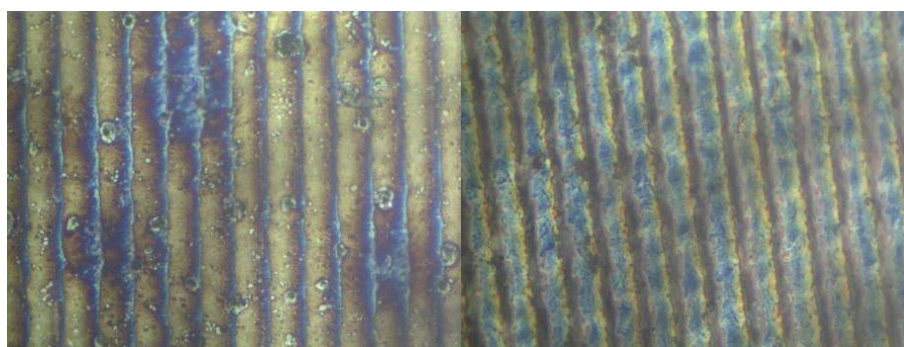
Таблица 3 – Химический состав некоторых участков поверхностного слоя сплава Р6М5 в зоне воздействия лазерного излучения

№ п/п	Метка спектра	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4 (необработанный)
1	C	26,69	4,82	5,31	7,33
2	O	11,38	2,67	–	0,79
3	Al	0,44	0,08	0,12	–
4	Si	0,31	0,23	0,40	0,48
5	Cl	0,39	0,03	0,01	–
6	K	0,74	0,00	0,02	0,20
7	Co	6,00	0,00	0,00	0,57
8	V	0,92	2,15	1,83	1,68
9	Cr	2,60	4,31	3,95	4,07
10	Fe	48,04	73,66	76,72	74,40
11	Mo	1,35	5,15	4,89	4,43
12	W	1,13	6,89	6,76	6,07
Всего		100,00	100,00	100,00	100,00

В ходе металлографических исследований было выявлено, что структура для быстрорежущего материала Р6М5 после лазерной абляции имеет равномерную дорожку (рисунок 11, а), а после диффузионного оксидирования происходит сглаживание (рисунок 11, б).

Таблица 4 – Химический состав некоторых участков поверхностного слоя сплава Т15К6 в зоне воздействия лазерного излучения

№ п/п	Метка спектра	Спектр 1	Спектр 2	Спектр 3	Спектр 4 (необработанный)
1	C	8,94	5,47	6,42	7,98
2	N	0,46	8,07	4,94	0,38
3	O	14,18	14,70	11,91	1,2
4	Na	0,08	1,73	0,98	0,27
5	Mg	–	0,10	–	–
6	Al	0,03	0,12	0,42	0,35
7	Si	–	0,38	0,56	0,30
8	S	–	0,88	1,43	0,15
9	Cl	–	1,75	3,36	–
10	K	–	1,77	1,64	0,11
11	Ca	–	3,59	1,20	0,27
12	Ti	56,67	8,88	6,13	12,14
13	Cr	–	–	0,25	0,26
14	Fe	0,15	0,36	0,37	0,28
15	Co	9,58	1,32	1,55	6,07
16	W	9,90	50,87	58,82	70,24
Всего		100,00	100,00	100,00	100,00



а

б

Рисунок 11 – Микроструктура поверхности образца Р6М5 после комбинированного оксидирования (увеличение $\times 200$): а – лазерная абляция; б – диффузионное оксидирование

Результаты исследований показали, что при синтезе дискретного диффузионного слоя на стали в первую очередь происходит образование гематита. Формирование гематита (Fe_2O_3) наблюдается при относительно высоком содержании кислорода на начальной стадии процесса.

Затем по мере снижения концентрации кислорода в ионизированном воздухе под слоем гематита образуется слой магнетита (Fe_3O_4) и еще ниже – слой вюстита (FeO) в виде тонкой дискретной эпитаксиальной пленки. Однако структура для твердосплавного материала Т15К6 после абляции имеет неравномерную пупырчатость (рисунок 12, а), а после диффузионного оксидирования – сглаживание (рисунок 12, 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.

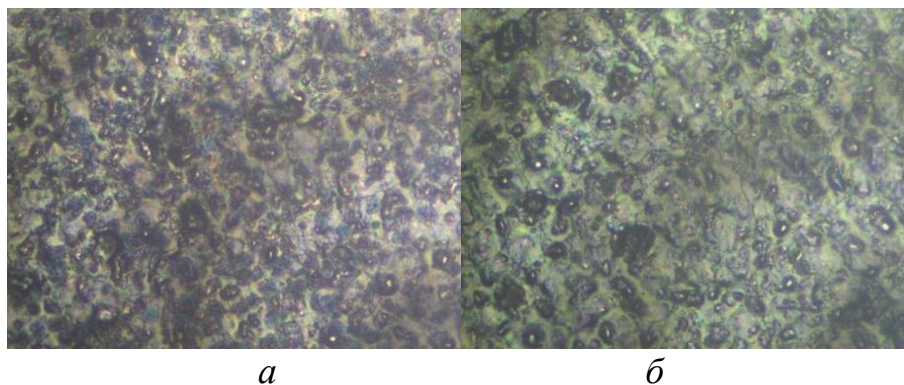


Рисунок 12 – Микроструктура поверхности образца Т15К6 после комбинированного оксидирования (увеличение $\times 200$): *а* – лазерная абляция; *б* – диффузионное оксидирование

Результаты определения значений микротвердости поверхности исследуемых материалов приведены в таблицах 5 и 6. На рисунке 13 представлены фото экспериментальных образцов до обработки, после лазерной абляции и с комбинированным лазерно-диффузионным покрытием.

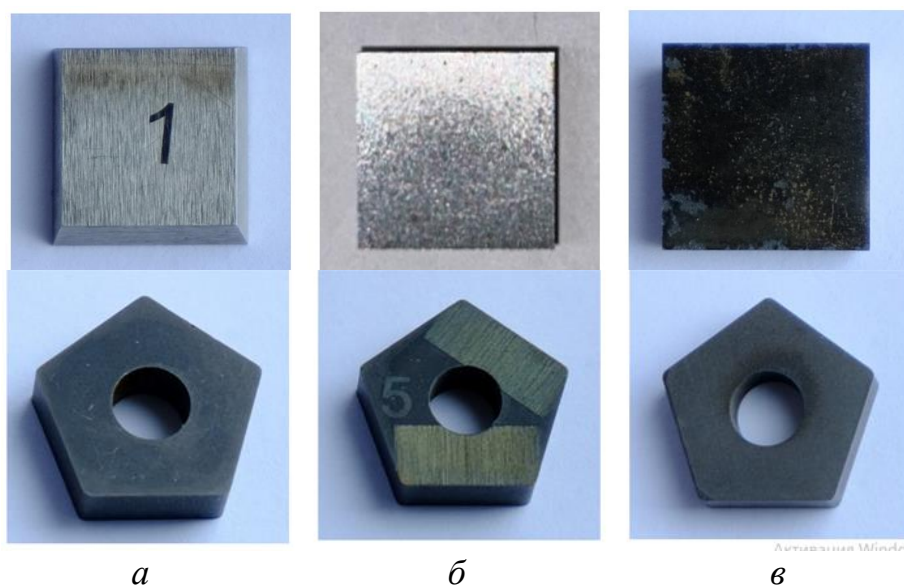


Рисунок 13 – Фото поверхности экспериментальной четырехгранной пластины из инструментального материала Р6М6 и пятигранной пластины из сплава Т15К6: *а* – до обработки; *б* – после лазерной абляции; *в* – с комбинированным лазерно-диффузионным покрытием

Таблица 5 – Результаты определения микротвердости образцов исследуемых материалов из сплава Р6М5

№ пластины	Вид обработки	Микротвердость, <i>HV</i>				
		871,840	823,2	670,117	770,26	728,787
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 6 – Результаты определения микротвердости образцов исследуемых материалов из сплава Т15К6

№ пластины	Вид обработки	Микротвердость, <i>HV</i>				
		1482,49	1128,10	623,29	812,613	1329,45
5	ЛА	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 5 и 6 показывают, что после диффузионного оксидирования микротвердость поверхностного слоя уменьшилась на 0,9...1,12 %.

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 датчиком TS100. Полученные данные позволили провести анализ изменения микрорельефа на различных этапах технологического процесса и построить диаграммы зависимости значений Ra и Rz от вида обработки (рисунки 14 и 15).

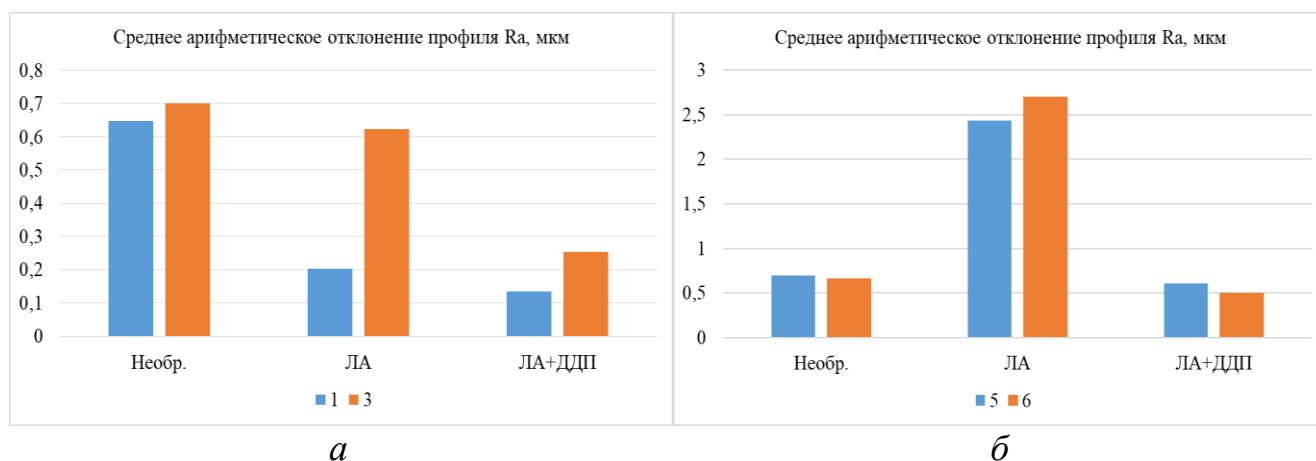


Рисунок 14 – Диаграммы зависимости Ra от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки для: а – поверхности пластин Р6М5; б – поверхности пластин Т15К6

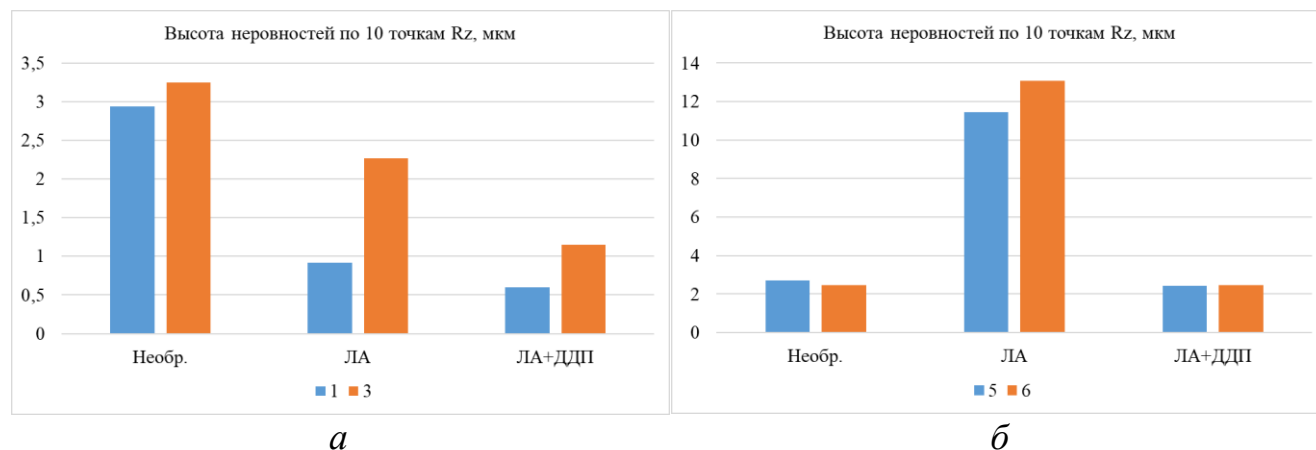


Рисунок 15 – Диаграммы зависимости Rz от режимов лазерной абляции и дискретной диффузионной обработки для: а – поверхности пластин Р6М5; б – поверхности пластин Т15К6

Комбинированная технология лазерно-диффузионного модифицирования поверхности обеспечивает снижение шероховатости на 60...80 % и формирование прочной оксидной пленки.

Проведены испытания на износ и долговечность на токарном станке SAMAT-400M (рисунок 16) при операции наружного продольного точения круглой заготовки из стали 45 резцами с токарными пластинами из P6M5 при подаче СОТС (масло И30) по технологии минимальной смазки. Установлено, что комбинированная обработка увеличивает срок службы инструмента в 2...2,5 раза.

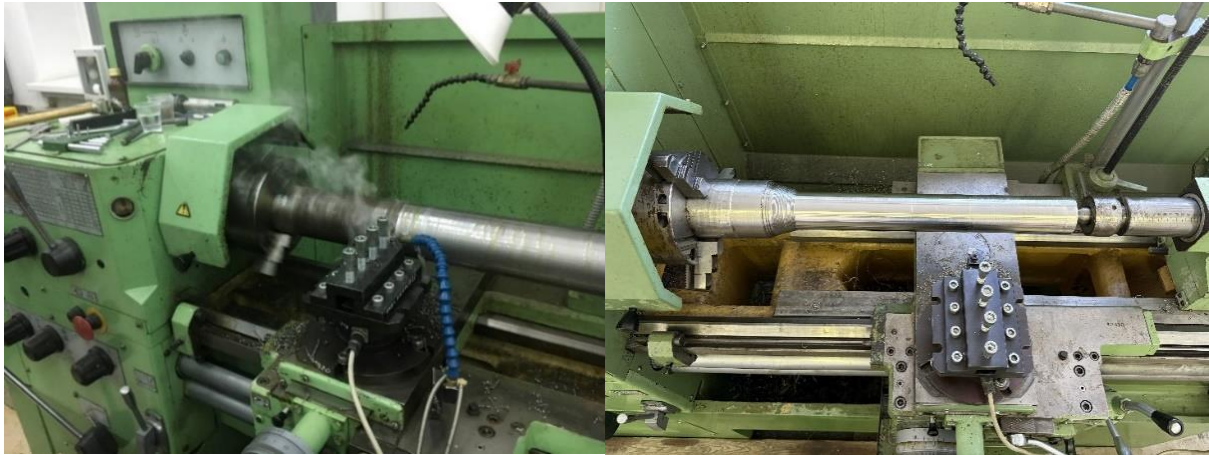


Рисунок 16 – Экспериментальная установка на базе токарного станка SAMAT – 400М

Анализ результатов экспериментальных исследований, полученных при механической обработке опытных образцов, позволил получить диаграммы износа по задней поверхности режущего инструмента и увеличения нароста при разных скоростях резания (рисунки 17 и 18).

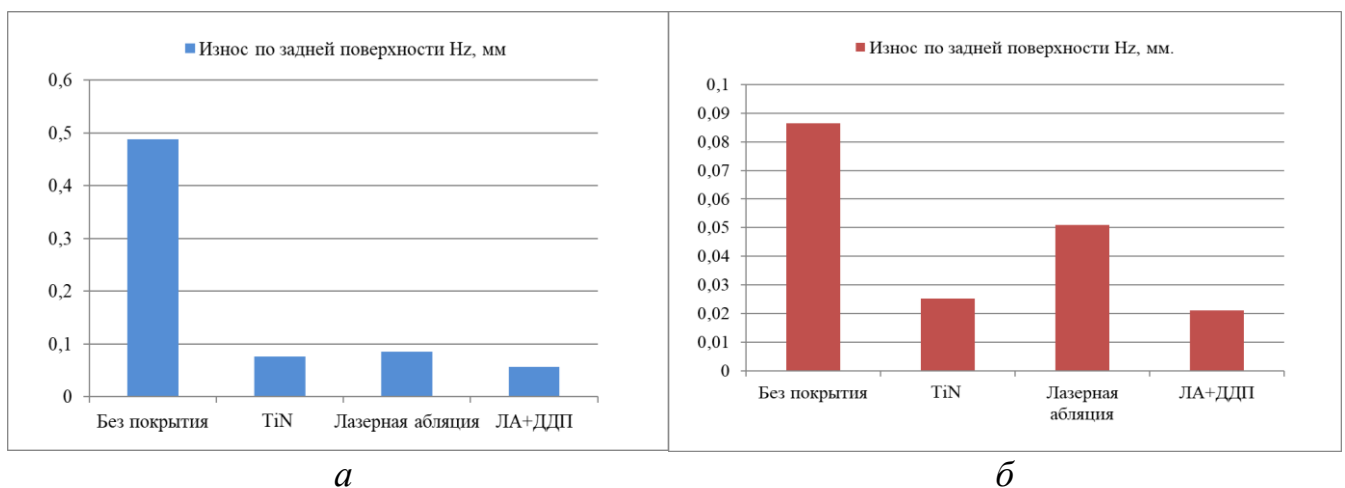


Рисунок 17 – Диаграммы износа по задней поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при: а – $V=50$ м/мин; б – $V=70$ м/мин

Стойкостные испытания на токарном станке SAMAT-400M при обработке стали 45 показали, что комбинированная технология обеспечивает минимальный износ по задней поверхности ($H_z=0,057$ мм при $V=50$ м/мин, $H_z=0,021$ мм при $V=70$ м/мин, снижение на 75,6...88,3 % по сравнению с пластинами без покрытия) и наростообразование (0,056...0,049 мм, снижение на 70,4...85,2 %), превосходя покрытие из TiN на 16,3...25,0 % по износу и на 70,6...88,8 % по наростообразованию.

Синергетический эффект комбинированной абляционно-диффузионной модификации обусловлен микроструктурированием поверхности, снижающим адгезию, и формированием оксидной пленки, уменьшающей трение и повышающей коррозионную стойкость, что увеличивает стойкость инструмента на 20...30 % по сравнению с покрытием из TiN и на 50...70 % по сравнению с пластинами без покрытия.

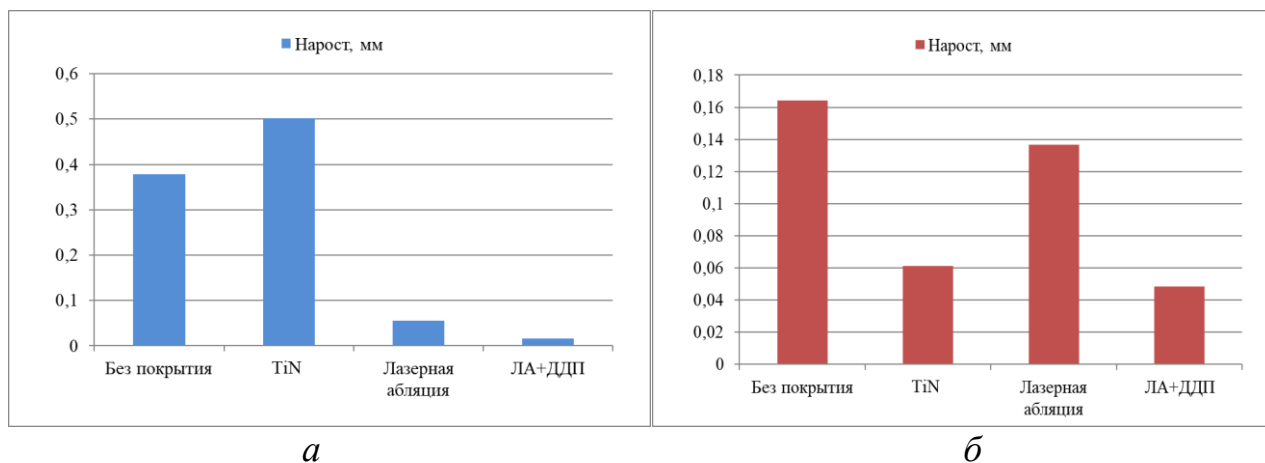


Рисунок 18 – Диаграммы образования нароста на поверхности режущего инструмента в зависимости от вида модификации при: а – $V=50$ м/мин; б – $V=70$ м/мин

Технология абляционно-диффузионной обработки перспективна для промышленного применения в условиях высоких скоростей резания, обеспечивая улучшение качества обработки заготовок и снижение эксплуатационных затрат.

Промышленные испытания технологии создания микро- и наноструктур на поверхности металлорежущего инструмента для повышения износостойкости, с использованием лазерного излучения выполнялись на предприятии ООО «Завод Фиолент». Лазерному модифицированию подвергались резцы с напаянной твёрдосплавной пластиной ВК8 специальной геометрии (рисунок 19, а). Промышленные испытания проводились на базе специального токарного станка для точения коллектора ротора двигателя электроинструмента (рисунок 19, б).

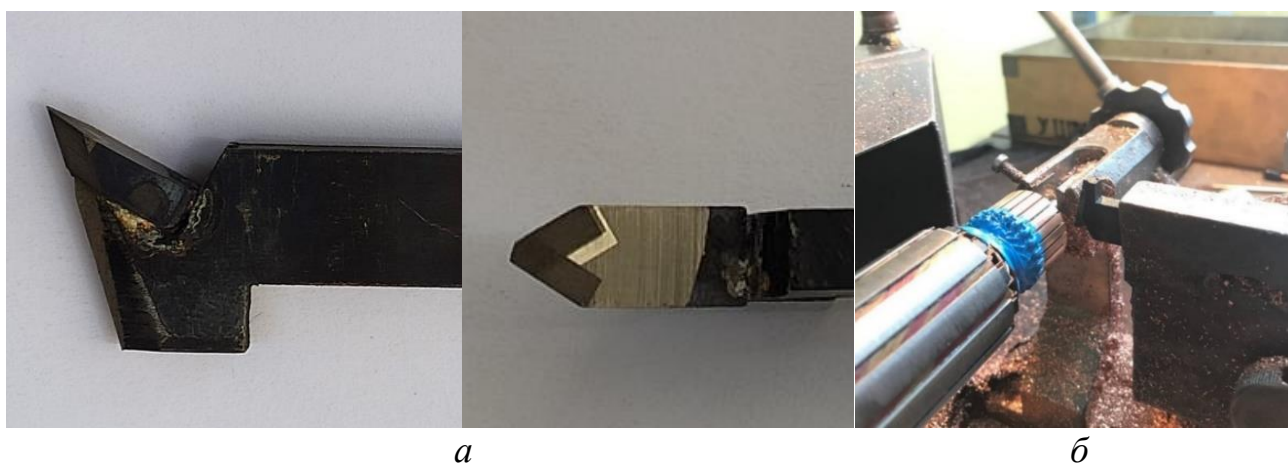


Рисунок 19 – Резец с напаянной твёрдосплавной пластиной: а – пластина ВК8 специальной геометрии; б – процесс обработки коллектора ротора

Описана эффективность применения технологии лазерной абляции при модифицировании поверхности резца и увеличении ее стойкости в 3 раза в промышленных условиях.

Применение режущего инструмента с абляционно-диффузионной модификацией поверхности и внедрение комбинированной технологии отражены в актах и рекомендациях для учебного процесса ГБОУВО РК КИПУ имени Февзи Якубова и предприятий машиностроения.

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 (напряжение, сила тока, давление газа) 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, $H_z=0,021$ мм при $V=70$ м/мин – на 75,6...88,3 % ниже, чем у пластин без покрытия) и предотвращает наростообразование (0,056...0,049 мм – снижение на 70,4...85,2 %), превосходя покрытие TiN на 16,3...25 % по износу и на 70,6...88,8 % по устойчивости к наросту. Показано, 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 Р6М5, где достигается снижение шероховатости на 60...80 %, тогда как для Т15К6 требуется оптимизация параметров абляции для устранения «пупырчатости». Разработаны практические рекомендации для использования лазерных установок «FMark-100 NS» и «МиниМаркер 2-20А4».

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...2,5 раза, снижение затрат на обслуживание и закупку инструмента.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ и
индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science*

1. 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. (ВАК)

2. 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. (ВАК)

3. 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. (ВАК)

4. 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 VHDJUO. (ВАК)

5. 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. (ВАК)

6. Sefedin, I. B. Mathematical modeling of process optimization in profiling grinding wheels via laser / I. B. Sefedin, E. Yagyaev // Materials Science Forum. – 2021.

– Vol. 1037 MSF. – P. 315-321. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.315. – EDN EYSSJU.

Патенты

7. 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. Б. Д. о. Сефедин, Э. Э. Ягьяев, Э. Д. Умеров. – EDN EJOCCQ.

8. 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. Джемалудинов, И. Э. Теминдаров, И. Б. Д. о. Сефедин. – EDN QVEDDU.

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

9. Алиев, А. И. Влияние температуры на протекание адгезионных процессов при лезвийной обработке в среде масел растительного происхождения / А. И. Алиев, Э. Э. Ягьяев, И. Д. Сефедин // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2022. – № 1(75). – С. 199-203. – DOI 10.34771/UZCEPU.2022.1.75.041. – EDN AEVPLM.