

На правах рукописи

Бадекин Максим Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН ИОННО-ПЛАЗМЕННЫМИ
МЕТОДАМИ

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Научный руководитель

Борулько Вячеслав Григорьевич

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры техносферной безопасности ФГБОУ
ВО «Российский государственный аграрный
университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Апажев Аслан Каральбиевич

доктор технических наук, профессор, проректор
по молодёжной политике и дополнительному
профессиональному образованию ФГБОУ ВО
«Кабардино-Балкарский государственный
аграрный университет имени В. М. Кокова»

Ружьев Вячеслав Анатольевич

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технических систем в
агробизнесе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный аграрный университет»

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный
аграрный университет имени И. Т. Трубилина»

Защита состоится 27 ноября 2025 года в 10.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: 8 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 35.2.030.03 _____ Н. Н. Пуляев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современных агротехнологиях качество обработки почвы играет решающую роль в обеспечении высокой урожайности сельскохозяйственных культур. Одним из важнейших элементов почвообрабатывающих машин является плужной лемех – рабочий орган, подвергающийся интенсивному абразивному, ударному и механическому износу в процессе эксплуатации.

По данным исследований, износ рабочих органов почвообрабатывающих машин приводит к значительным потерям в агропромышленном комплексе. Так, по статистике, около 70% всех отказов сельскохозяйственной техники связано с износом рабочих элементов, при этом до 40% из них – это механическое стирание лемехов плугов.

Интенсивный износ лемехов обусловлен следующими основными факторами: Абразивное воздействие почвы – частицы песка, глины и других твердых включений вызывают постепенное истирание поверхности металла. Высокие динамические нагрузки – при контакте с плотными слоями почвы и каменистыми включениями возникают ударные нагрузки, приводящие к механическому разрушению рабочих кромок лемехов. Коррозионное воздействие – в условиях повышенной влажности и агрессивной среды почвы происходит химическая коррозия, усугубляющая процесс износа.

Быстрый износ плужных лемехов приводит к значительным негативным последствиям, включая снижение качества обработки почвы, рост эксплуатационных затрат, увеличение расхода топлива и повышение нагрузки на сельскохозяйственную технику. Кроме того, он оказывает влияние на экологическое состояние почвенных ресурсов.

Для предотвращения этих проблем необходимо применять разнообразные методы модификации рабочих поверхностей лемехов, которые позволяют увеличить срок службы, повысить экономическую эффективность сельскохозяйственного производства и снизить его негативное воздействие на окружающую среду. Развитию именно этого направления и посвящена данная работа.

Степень разработанности темы. Проблемами повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин занимался ряд отечественных авторов: Самсонов В.А., Дидманидзе О.Н., Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Голубев И.Г., Кравченко И.Н., Балабанов В.И., Парлюк Е.П., Казанцев С.П., Апажев А.К., Ружьев В.А. и многие другие ученые.

Анализ литературных источников показал, что, несмотря на значительное количество исследований, направленных на повышение износостойкости, далеко не все вопросы, связанные с обеспечением комплексной долговечности рабочих органов в условиях знакопеременных и ударных нагрузок, а также агрессивного абразивного износа, получили исчерпывающее решение. Существующие технологии упрочнения, восстановления и защиты поверхностей, такие как плазменная наплавка, CVD-

покрытия, электроискровая обработка и фрикционное легирование, демонстрируют высокую эффективность в отдельных аспектах, но зачастую не обеспечивают оптимального сочетания прочности, ударной вязкости и сопротивления износу для широкого класса ответственных деталей.

Особую актуальность в свете задач импортозамещения приобретает разработка новых материалов и технологий, позволяющих существенно повысить срок эксплуатации рабочих органов по сравнению с серийно выпускаемыми аналогами. Последние исследования в области материаловедения, включая разработку высокопрочных низколегированных сталей, показали значительный потенциал в достижении высокой прочности, однако зачастую сопровождаются недостаточной ударной вязкостью, что критично для инструмента, работающего в условиях динамических нагрузок.

Таким образом, комплексная проблема повышения долговечности и ресурса рабочих органов требует дальнейших исследований, направленных на создание перспективных материалов с сбалансированным комплексом механических свойств, а также разработку экономичных и технологичных методов упрочнения и восстановления.

Научная задача заключается в разработке методов повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих орудий (плужных лемехов) за счет оптимизации структурно-фазового состояния и трибологических характеристик наплавленных слоёв с применением вакуумного отжига и нанесения износостойких покрытий.

Область исследований. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 4.3.1 «Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса»:

9. Методы, средства исследований и испытаний машин, оборудования и технологий для агропромышленного комплекса.

21. Методы оценки качества материалов, металлов, технических жидкостей, изделий, машин, оборудования, поточных линий в агропромышленном комплексе.

24. Методы исследования конструкционных материалов (в том числе наноматериалов) для применения в технологиях и технических средствах агропромышленного назначения.

Цель исследования – повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин путём получения на их поверхности износостойких покрытий с помощью ионно-плазменных методов.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо последовательно решить следующие основные задачи исследования:

1. Экспериментально определить влияние температуры и длительности вакуумного отжига на формирование диффузионной зоны, морфологию карбидов и микротвердость в системе «сталь Л53 — наплавка Сормайт» с целью подтверждения оптимального режима 1000°C / 180 мин.

2. Установить корреляцию между параметрами вакуумного отжига и механическими свойствами, обеспечив сохранение пластичности при достижении толщины диффузионной зоны ~200 мкм.

3. Оптимизировать режимы вакуумно-дугового напыления TiN для достижения прочности сцепления ≥ 450 МПа и коэффициента трения $\leq 0,35$ при толщине покрытия 4,0 мкм.

4. Провести полевые испытания модифицированных лемехов на износостойкость, коррозионную стойкость и тяговое сопротивление в условиях серой лесной почвы с фиксацией ресурса в га обработки и сравнением с серийными образцами.

5. Разработать регламент внедрения технологии, включающий параметры оборудования, нормы расхода материалов, методы контроля качества и экономические показатели, обеспечивающий воспроизводимость результатов в серийном производстве и при восстановлении рабочих органов.

Границы исследования ограничены применением конкретных материалов, охватывающих определенные методы обработки.

Объект исследования – осажденные покрытия нитридов переходных металлов на рабочие органы почвообрабатывающих машин на примере лемеха ПЛЖ РЗЗ.31-702 после вакуумного отжига.

Предмет исследования – процессы структурно-фазовых преобразований и триботехнические характеристики композиционных систем «сталь-наплавка» и «сталь-покрытие» при вакуумной термообработке и нанесении защитных покрытий на рабочие органы почвообрабатывающих орудий.

Методы исследования: при решении поставленных задач использовали металлографический анализ, рентгеноструктурный анализ, электронную микроскопию, испытания на микротвердость, трибологические тесты, полевые испытания с контролем тягового усилия.

Научная новизна заключается в разработке и реализации принципиально нового подхода к созданию функциональных покрытий на поверхности почвообрабатывающих орудий, основанного на комбинированном применении вакуумного отжига и вакуумного напыления. В отличие от традиционных методов модификации поверхностных слоёв, которые зачастую ограничиваются использованием одного из технологических приёмов, предложенный в работе подход предполагает синергетическое взаимодействие двух высокотехнологичных процессов, что позволяет достичь значительно более высоких эксплуатационных характеристик покрытий.

Теоретическая значимость работы заключается в разработке и научном обосновании нового комплексного подхода к повышению долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин, основанного на синергетическом сочетании вакуумного отжига и ионно-плазменного напыления.

Практическая значимость работы заключается в разработке промышленной технологии изготовления плужных лемехов с ресурсом,

превышающим серийные аналоги в 2,5–6,5 раз. Это достигается комбинированным упрочнением: наплавкой сплава Сормайт, вакуумным отжигом и нанесением покрытия TiN. Внедрение технологии обеспечивает сельхозпредприятиям прямую экономию за счёт резкого сокращения затрат на закупку запчастей, снижения расхода топлива на 5% и уменьшения трудозатрат на обслуживание. Для крупного хозяйства с 1000 плугов годовой экономический эффект составляет около 13,9 млн рублей, а срок окупаемости капитальных вложений — всего 1 год.

Реализация результатов исследования

Результаты исследований используются на машиностроительных предприятиях для: серийного производства упрочненных лемехов ПЛЖ-31-702, внедрения технологии вакуумного отжига в технологические цепочки, нанесения износостойких TiN-покрытий на рабочие органы.

На защиту выносятся

1. Разработана эффективная технология упрочнения. Создана эффективная технология изготовления лемехов: наплавка сплава Сормайт на сталь Л53 → вакуумный отжиг при 1000°C → нанесение покрытия TiN методом PVD → финишный отжиг при 500°C в течении 180 мин, обеспечивающая ресурс в 2,5-6,5 раз выше серийных аналогов.

2. Доказано значительное повышение эксплуатационных характеристик. Комплексное упрочнение повышает износостойкость в 2,5-6,5 раз и снижает тяговое сопротивление плуга на 5% за счет низкого коэффициента трения покрытия TiN.

3. Подтверждена удовлетворительная экономическая эффективность. Внедрение технологии обеспечивает крупному хозяйству (1000 плугов) годовой экономический эффект около 13,9 млн рублей за счет сокращения затрат на закупку лемехов, топливо и обслуживание, с окупаемостью капитальных вложений за ~1 год.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на всероссийских и международных научно-практических конференциях: Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2024) : Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Bukhara, 2024; IV Всероссийская научно-практическая конференция «Digital Era», Грозный, 2024.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы 10 научных работах (4,63 п.л., авторского вклада 3,71 п.л. или 80,00 %), в том числе в изданиях, включаемых в перечень ВАК, опубликовано 5 работ (2,60 п.л., авторского вклада 2,08 п.л. или 80,00 %), 2 статьи в международных изданиях (CA(core), Scopus, Springer, WoS(SCIE)), имеется 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, пять глав, общие выводы, список используемой литературы из 134 наименований, в том числе 51 на иностранном языке и приложения на 2 страницах. Объем диссертации 244 страниц машинописного текста, в том числе 219 страниц основного текста, поясняется 3 таблицами и 9 рисунками.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность повышения долговечности плужных лемехов, подвергающихся интенсивному абразивному, ударному и коррозионному износу, что ведёт к росту эксплуатационных затрат и снижению качества обработки почвы. Сформулирована цель исследования, обозначены научная новизна, практическая значимость и основные задачи работы, включая оптимизацию режимов термообработки и покрытия, полевые испытания и технико-экономическое обоснование технологии.

В первой главе «Состояние вопроса повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин ионно-плазменными методами» проведен комплексный анализ состояния вопроса повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин, в частности плужных лемехов, подвергающихся интенсивному абразивному, ударному и коррозионному износу. Обоснована актуальность проблемы: до 70% отказов сельхозтехники связано с износом, причем около 40% приходится на лемехи, что ведет к росту эксплуатационных затрат, снижению качества обработки почвы и увеличению топливного потребления. Рассмотрены условия работы рабочих органов — взаимодействие с абразивными частицами почвы (кварц, полевой шпат), динамические ударные нагрузки от камней и коррозионное воздействие влажной агрессивной среды. Проанализированы закономерности износа: доминирующим является абразивный износ, локализованный на режущих кромках и носках, при этом интенсивность износа может достигать 0,8–1,2 мм на 10 га обработки. Охарактеризованы конструкционные материалы — от традиционных углеродистых сталей (Ст3, 65Г) до специализированных марок, таких как Л53, а также современные высокопрочные низколегированные стали с оптимизированным содержанием хрома, молибдена и бора. Особое внимание уделено технологиям упрочнения: термической и химико-термической обработке, наплавке (в том числе сплавами типа Сормайт), газотермическому напылению, а также ионно-плазменным методам (PVD, CVD). Подчеркнута перспективность комбинированных подходов, сочетающих несколько методов для достижения синергетического эффекта. На основе сравнительного анализа установлено, что покрытия на основе нитрида титана (TiN) обладают оптимальным балансом твердости (~2500 HV), низкого коэффициента трения (0,4–0,6), коррозионной стойкости и технологичности. В итоге сформулированы выводы и поставлены задачи исследования: экспериментально оптимизировать режимы вакуумного отжига системы «сталь Л53 — наплавка Сормайт», разработать параметры напыления TiN для достижения высокой адгезии и износостойкости, провести полевые испытания и разработать регламент внедрения технологии в производство.

Во второй главе «Оценка влияния химического состава и технологии термообработки на эксплуатационные характеристики сталей» проведён всесторонний анализ влияния химического состава и термической обработки на эксплуатационные характеристики сталей, применяемых для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих

машин. Особое внимание уделено системе «сталь Л53 — наплавка Сормайт», которая рассматривается как перспективная композиционная структура, сочетающая прочность основы и износостойкость поверхностного слоя. Установлено, что химический состав стали напрямую определяет её микроструктуру и, как следствие, механические свойства. Углерод обеспечивает высокую твёрдость за счёт образования мартенсита и карбидов, однако его избыток снижает ударную вязкость. Легирующие элементы — хром, молибден, ванадий и вольфрам — способствуют дисперсионному упрочнению, образуя мелкодисперсные карбиды, устойчивые к абразивному износу. В частности, сталь Л53 содержит 0,45–0,55% С, 0,6–0,9% Мп и до 0,4% Si, что обеспечивает оптимальный баланс прочности и вязкости, тогда как наплавка Сормайт характеризуется высоким содержанием Cr (25–31%) и С (2,5–3,3%), формируя твёрдый слой с микротвёрдостью до 800 HV. Эксперименты показали, что такая комбинация повышает износостойкость в 3–5 раз по сравнению с ненаплавленной сталью, а срок службы деталей увеличивается в 2,5–3 раза. Однако при этом возникает проблема снижения ударной вязкости наплавленного слоя (до 5–8 Дж/см²) и повышения порога хрупкости, что требует применения промежуточных вязких слоев или легирования никелем для стабилизации аустенитной матрицы.

Далее подробно рассмотрено влияние термической обработки, в особенности вакуумного отжига, на механические свойства композитной системы. Показано, что вакуумная среда исключает окисление и обезуглероживание, обеспечивая чистоту поверхности и однородность структуры. Оптимальным режимом для системы Л53–Сормайт признан отжиг при 1000°C с последующим низкотемпературным отпуском (200–300°C), что позволяет достичь твёрдости 45–50 HRC для основы и 60–65 HRC для наплавки. Ключевую роль играет снятие остаточных напряжений, возникающих из-за различия коэффициентов теплового расширения между сталью и наплавкой. Без термообработки эти напряжения могут превышать предел текучести, вызывая трещинообразование. Отпуск способствует частичному распаду мартенсита, выделению дисперсных карбидов и стабилизации остаточного аустенита, что повышает ударную вязкость без существенного снижения твёрдости. При этом подчёркивается, что чрезмерно высокая скорость охлаждения или превышение времени выдержки приводят к укрупнению карбидов, росту зёрен и снижению пластичности, что подтверждается как металлографическими, так и механическими испытаниями.

Проанализированы эксплуатационные факторы, определяющие интенсивность износа рабочих органов. Установлено, что доминирующим механизмом является абразивный износ, вызываемый кварцем и другими твёрдыми частицами почвы, особенно в песчаных грунтах, где их содержание достигает 60–80%. Дополнительно действуют коррозионно-механический износ (усиливается в присутствии удобрений и при высокой влажности) и ударно-абразивный износ при контакте с камнями. Интенсивность износа зависит от типа почвы, скорости движения агрегата, глубины обработки и угла

атаки рабочего органа. Например, увеличение скорости с 5 до 10 км/ч может удвоить износ, а обработка песчаных почв — ускорить его в 3–4 раза по сравнению с глинистыми. Для борьбы с этими факторами предложено комплексное решение: использование износостойких материалов, применение упрочняющих покрытий, оптимизация конструкции (угол наклона, форма кромки) и внедрение технологий восстановления, таких как лазерная или электродуговая наплавка.

Сравнительный анализ методов синтеза упрочняющих покрытий показал, что наиболее сбалансированным по совокупности свойств является нитрид титана (TiN), обладающий твёрдостью 20–30 ГПа, низким коэффициентом трения (0,4–0,6), отличной коррозионной стойкостью и хорошей адгезией к металлическим подложкам. В отличие от более дорогих TiAlN или термически нестабильных DLC-покрытий, TiN легко наносится методом магнетронного распыления при умеренных температурах (200–450°C), не деформируя основу. Научно обоснован выбор именно TiN в качестве финишного покрытия для системы Л53–Сормайт: он дополняет высокую твёрдость наплавки низким трением и пассивирующим слоем TiO₂, предотвращающим коррозию. Предложена технологическая цепочка: наплавка Сормайта → вакуумный отжиг при 1000°C → нанесение TiN методом PVD → финишный отжиг при 500°C для снятия напряжений. Таким образом, во второй главе сформирована теоретическая и экспериментальная база для разработки эффективной технологии комплексного упрочнения, сочетающей преимущества композиционных материалов, вакуумной термообработки и ионно-плазменных покрытий.

В третьей главе «Материалы, программа и методики исследования» подробно описаны материалы, программа и методики, использованные в экспериментальных исследованиях, направленных на повышение долговечности плужных лемехов путём комбинированного упрочнения. В качестве базового материала выбрана серийно выпускаемая сталь Л53, применяемая для изготовления лемехов модели ПЛЖ-31-702, а в качестве упрочняющего слоя — наплавка сплавом Сормайт, содержащим до 31% хрома и 3,3% углерода. Из наиболее изнашиваемой зоны лемеха были вырезаны плоские образцы размером 20×30 мм, которые прошли строгую подготовку, включая шлифовку и полировку, с последующей очисткой от загрязнений. Программа испытаний была построена как логическая последовательность этапов: сначала проводился вакуумный отжиг при 1000°C с варьируемой выдержкой (60, 180 и 300 мин) для оптимизации структуры наплавки и формирования диффузионной зоны; затем на оптимальные образцы наносилось покрытие TiN толщиной 3,5 мкм методом PVD при температуре подложки 200°C и давлении 0,5–1,0 Па; завершающим этапом стал финишный отжиг при 500°C в течение 180 мин для снятия остаточных напряжений и улучшения адгезии покрытия.

Для всесторонней оценки полученных композитных систем были задействованы современные аналитические методы. Металлографический анализ выполнялся на микроскопе НЕОРНОТ-32 с последующей обработкой

изображений в программе ImageJ. Толщина диффузионной зоны определялась по профилю яркости, где границы находились как точки экстремума производной интенсивности ($I(x)$):

$$\frac{dI}{dx} = \max \text{ или } \min. \quad (1)$$

Измерение микротвёрдости проводилось на приборе ПМТ-3 по методу Виккерса при нагрузках от 10 до 200 мН. Для коррекции размерного эффекта применялась модель Никса–Гао:

$$H = H_0 \left(1 + \frac{h^*}{h} \right), \quad (2)$$

где (H_0) — твёрдость при бесконечной глубине внедрения, (h) — глубина отпечатка, (h^*) — характерная длина. Рентгеноструктурный анализ на дифрактометре ДРОН-4 с Cu-K α излучением позволил идентифицировать фазы и оценить микродеформации методом Вильямсона–Холла:

$$\beta \cos \theta = \frac{K\lambda}{D} + 4\varepsilon \sin \theta, \quad (3)$$

где (β) — уширение пика, (D) — размер кристаллитов, (ε) — микродеформации. Сканирующая электронная микроскопия на приборе LEO 1430 VP с детектором обратно рассеянных электронов обеспечила высокочеткое изображение границ раздела фаз и морфологии карбидов.

Особое внимание уделено оценке коррозионной стойкости в условиях, имитирующих реальную эксплуатацию в засоленных почвах. Была разработана оригинальная микроскопическая модель, связывающая скорость коррозионного износа ($v_{кор}$) с твёрдостью материала (H), шириной диффузионной зоны (δ) и степенью засоленности (S):

$$v_{кор} = v_0 \cdot \left(\frac{S}{S_0} \right)^n \cdot \exp \left(-\frac{\delta}{\delta_0} \right) \cdot \left(\frac{H_0}{H} \right)^m, \quad (4)$$

где (v_0) — базовая скорость коррозии, ($S_0 = 1\%$), ($n \approx 0.7$), ($\delta_0 = 1$ мкм), ($m = 0.5$). Эта модель учитывает подавление микрогальванических пар за счёт плавного градиента состава и снижение плотности активных центров коррозии при повышении твёрдости.

Завершающим и наиболее значимым этапом программы стали полевые испытания на опытном поле в Краснодарском крае, где опытные лемехи агрегатировались с плугом ПЛН-3-35 на тракторе МТЗ-82 и эксплуатировались на серой лесной почве плотностью 1,45 г/см³ и влажностью 22%. Ключевым методом оценки стал высокоточный контроль потери массы после каждых 50 га обработки. Полученные данные обрабатывались по адаптированной методике Тикалова–Ефремова, где интенсивность изнашивания (J_j) и износостойкость (J_s) рассчитывались по формулам:

$$J_j = \frac{I_z}{S}, \quad J_s = \frac{1}{J_j}, \quad (5)$$

где (I_z) — суммарная потеря массы, (S) — обработанная площадь. Относительная износостойкость определялась как отношение ($J_s^{\text{опыт}}/J_s^{\text{эталон}}$). Такой комплексный подход — от лабораторного анализа структуры до полевых испытаний в реальных условиях — обеспечил получение объективных, количественно измеримых и практически значимых результатов, подтверждающих эффективность разработанной технологии упрочнения.

В четвертой главе «Результаты экспериментальных исследований» представлены результаты комплексных экспериментальных исследований, направленных на всестороннюю оценку эффективности разработанной технологии упрочнения плужных лемехов из стали Л53, сочетающей наплавку сплавом Сормайт, вакуумный отжиг и нанесение покрытия нитрида титана (TiN). Исследования охватывали как лабораторные методы анализа микроструктуры и механических свойств, так и полевые испытания в реальных условиях эксплуатации, что позволило получить объективные и количественно измеримые данные о повышении ресурса и износостойкости.

Начальный этап исследований был посвящён металлографическому анализу образцов, подвергнутых вакуумному отжигу при 1000°C с различной длительностью выдержки (60, 180 и 300 мин).

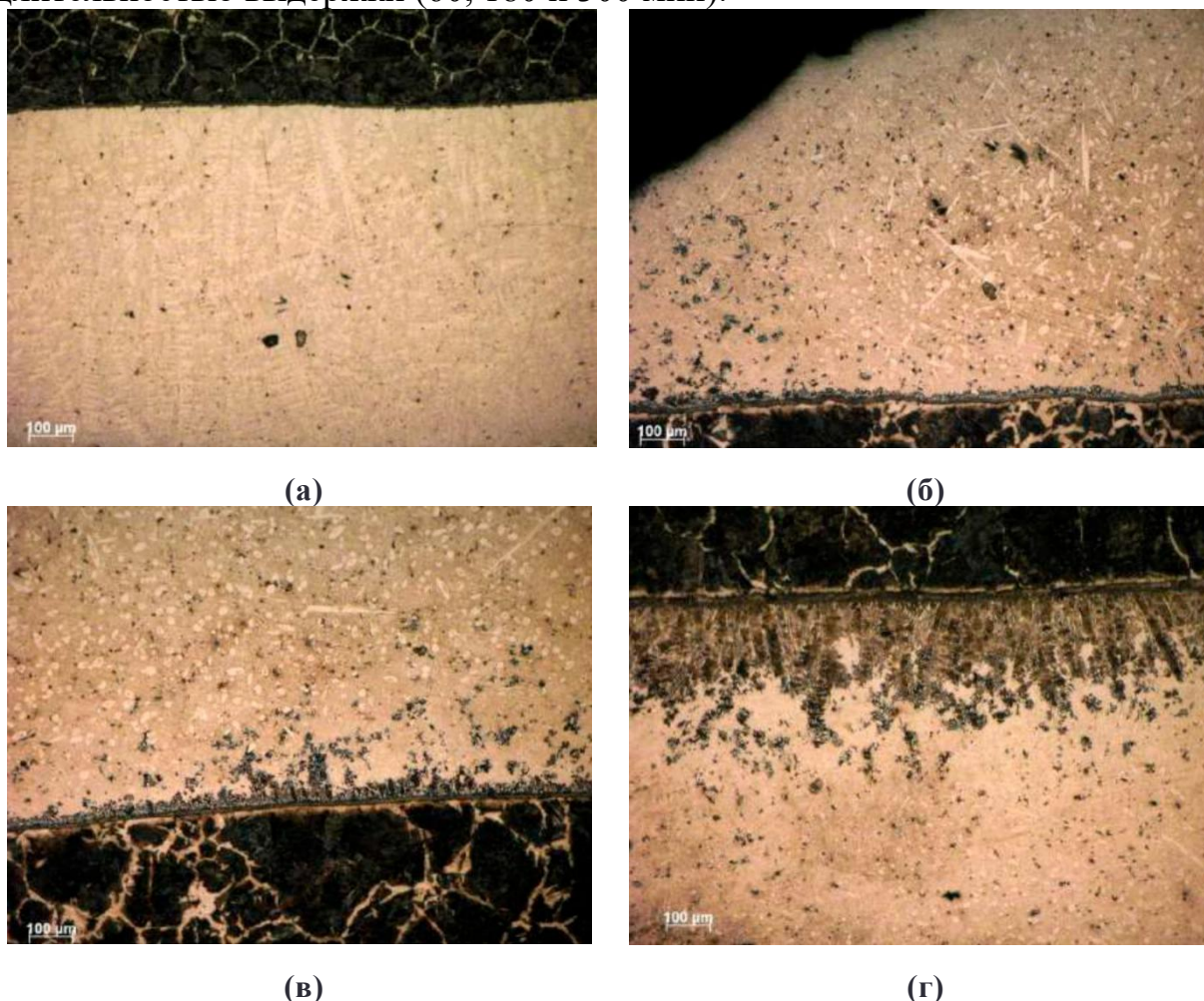
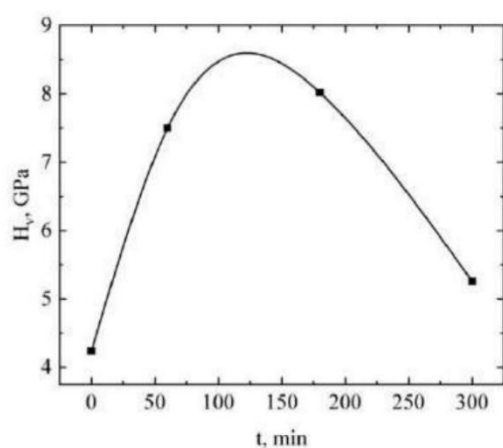


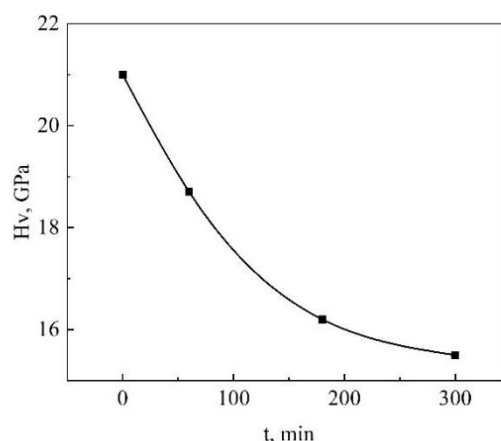
Рисунок 1 – Микроструктура границы раздела сталь Л-53/наплавка Сормайт после отжига при $t = 1000^\circ\text{C}$ в вакууме (а) без отжига (б) отжиг в течении 60 мин (в) отжиг в течении 180 мин; (г) 300 мин

На рисунке 1 наглядно продемонстрирована динамика структурных превращений на границе раздела «сталь Л53 — наплавка Сормайт». В исходном состоянии (до отжига) граница резкая, с тонкой (~9 мкм) оксидной прослойкой и крупными хрупкими карбидами. После 60 минут отжига оксидная пленка частично растворяется, начинает формироваться диффузионная зона толщиной 20–40 мкм, а игольчатые включения σ -фазы претерпевают сфероидизацию. При выдержке 180 минут достигается оптимальное состояние: диффузионная зона расширяется до ~200 мкм, карбиды $(Cr,Fe)_7C_3$ становятся мелкодисперсными и равномерно распределёнными, а оксидная прослойка полностью устраняется. Однако при 300 минутах наблюдается деградация структуры — коалесценция карбидов и рост зёрен, что снижает прочность. Толщина диффузионной зоны количественно оценивалась по профилю яркости с использованием условия экстремума производной интенсивности.

Эти структурные изменения напрямую коррелируют с кинетикой изменения микротвёрдости, представленной на рисунке 2.



(а)



(б)

Рисунок 2 – Кинетика изменения микротвёрдости наплавленного слоя, а - системы «Сормайт – сталь Л-53» при вакуумном отжиге ($T = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$); б - системы «Сормайт – сталь Л-53-TiN» при вакуумном отжиге ($T = 500\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Исходная твёрдость наплавленного слоя составляла 4,24 ГПа. После 60 минут отжига она возросла до 6,12 ГПа за счёт устранения дефектов и начальной рекристаллизации. Максимальное значение 8,56 ГПа достигнуто при 180 минутах, что обусловлено дисперсионным упрочнением. Дальнейшая выдержка привела к снижению твёрдости до 5,26 ГПа из-за коалесценции упрочняющих фаз.

Особое внимание в главе уделено результатам рентгеноструктурного анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН-4 с Cu-K α излучением в угловом диапазоне 2θ от 35° до 50° . На рисунке 3 представлена дифрактограмма многофазного поверхностного слоя после двухступенчатого вакуумного отжига. Чётко идентифицированы следующие фазы: Cr_7C_3 , Ti, WC, Ti_2N , TiN, γ -Co и α -Fe. Доминирующим пиком является рефлекс α -Fe(110) при $44,7^{\circ}$ с интенсивностью 980 относительных единиц, что свидетельствует

о сохранении ферритной структуры основы стали Л53 даже после высокотемпературного отжига.

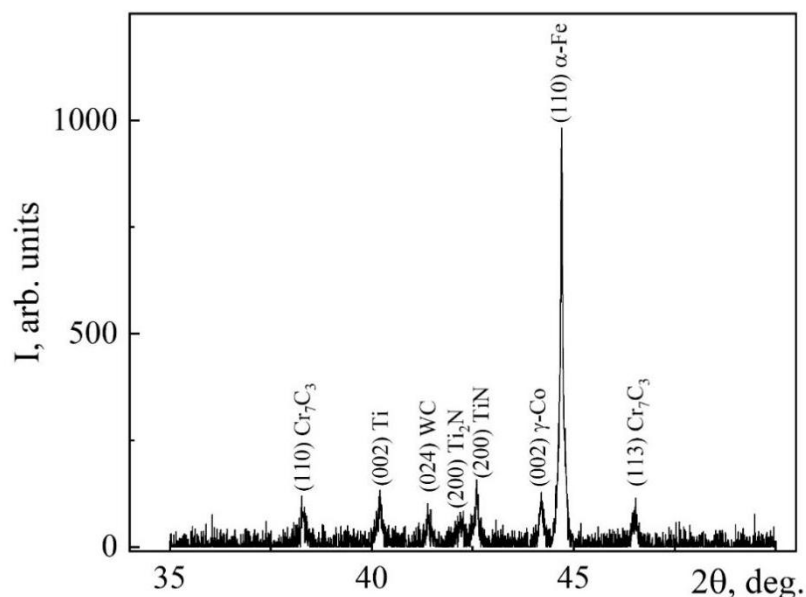


Рисунок 3 – Рентгеноструктурный анализ многофазного поверхностного слоя после вакуумного отжига

Вторым по интенсивности (130 отн. ед.) идёт пик γ -Co(002) при $44,2^\circ$, принадлежащий аустенитной матрице Сормайта, обеспечивающей вязкость наплавленного слоя. Важнейшими упрочняющими компонентами являются карбидные фазы — Cr_7C_3 с рефлексами (110) при $38,3^\circ$ и (113) при $46,5^\circ$, а также WC(024) при $41,4^\circ$. Эти пики подтверждают сохранение дисперсных карбидных выделений после отжига, что благоприятно для твёрдости и износостойкости. Ключевым элементом поверхностного слоя является нитрид титана, для которого идентифицирован пик TiN(200) при $42,6^\circ$ с интенсивностью 120 отн. ед. Высокая интенсивность при малой толщине покрытия (4 мкм) указывает на высокую плотность и кристалличность слоя, а также на возможную текстуру $\langle 100 \rangle$. Однако наряду с TiN обнаружены фазы Ti_2N (200) при $42,2^\circ$ и металлический титан Ti(002) при $40,2^\circ$, что свидетельствует о нестехиометрии покрытия и возможном недостатке азота при напылении или его частичной потере при вакуумном отжиге.

Параметры всех идентифицированных дифракционных рефлексов сведены в таблицу 1.

Таблица 1. – Параметры идентифицированных дифракционных рефлексов

Фаза	Индекс Миллера	2 θ , град	I, отн. ед.
Cr_7C_3	(110)	38.3	80
Ti	(002)	40.2	100
WC	(024)	41.4	60
Ti_2N	(200)	42.2	50
TiN	(200)	42.6	120
γ -Co	(002)	44.2	130
α Fe	(110)	44.7	980
Cr_7C_3	(113)	46.5	60

На основании интенсивностей и поправок на толщину и поглощение был рассчитан приблизительный фазовый состав в анализируемом объеме (верхние ~10 мкм образца), представленный в таблице 2.

Таблица 2. – Приблизительный фазовый состав в анализируемом объеме

Фаза	Содержание, масс, %	Примечание
α -Fe	55%	Основа, частично видна из-за «не идеальности» наплавки
γ -Co	20%	Матрица Сормайта
Cr_7C_3	10%	Упрочняющий карбид
WC	5%	Износостойкий карбид
TiN	6%	Покрытие (4 мкм)
Ti ₂ N	2.5%	Промежуточная фаза
Ti	1.5%	Металлическая фаза

Таким образом, рентгеноструктурный анализ не только подтвердил наличие всех целевых фаз, но и выявил необходимость оптимизации режимов напыления TiN для достижения более стехиометричного состава.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) на приборе LEO 1430 VP с детектором обратно рассеянных электронов (4QBSD) позволила визуализировать процессы интердиффузии с высоким Z-контрастом. На рисунке 4 представлены микрофотографии границы раздела при различных режимах отжига.

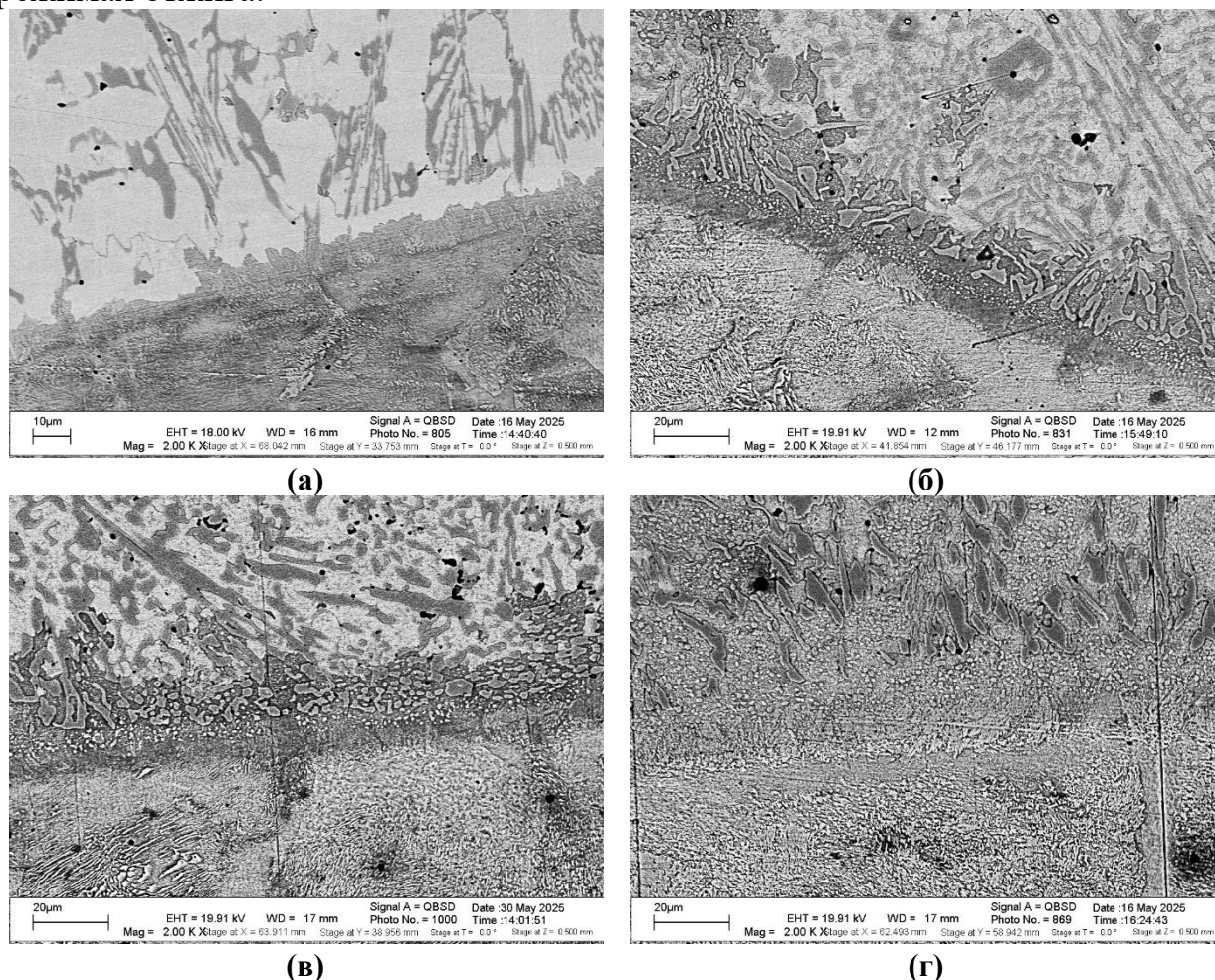


Рисунок 4 — Микроструктура границы раздела «сталь Л-53 / наплавка Сормайта» после вакуумного отжига при 1000 °С: (а) — без отжига; (б) — 60 мин; (в) — 180 мин; (г) — 300 мин

В исходном состоянии граница резкая и прямолинейная. После 60 минут отжига она становится размытой (15–20 мкм), формируются мелкие карбиды. При 180 минутах достигается оптимальное состояние: ширина диффузионной зоны ~200 мкм, контраст плавный и однородный, зона насыщена мелкодисперсными (0,2–1,5 мкм) карбидными частицами, равномерно распределёнными по объёму. Это состояние соответствует максимальной микротвёрдости и обеспечивает высокую адгезию между слоями. После 300 минут наблюдается деградация: карбиды укрупняются до 3–5 мкм, появляются микропоры и участки с пониженной плотностью, контраст становится «пятнистым», что указывает на нарушение химической однородности.

Особое внимание уделено анализу системы «Сормайт — TiN» после финишного отжига при 500°C. Теоретические расчёты показали, что коэффициенты диффузии Ti в Fe и Cr в TiN при этой температуре чрезвычайно малы ($\sim 10^{-21}$ м²/с), поэтому измеримая диффузионная зона не формируется. Граница раздела остаётся резкой и химически чёткой, а покрытие TiN сохраняет целостность, выполняя исключительно функцию инертного барьерного слоя. Поскольку визуальный анализ не выявил различий с исходным состоянием, изображения указанной границы опущены.

Сопротивление коррозии в условиях засоленных почв было предметом отдельного углубленного изучения. Была разработана микроскопическая модель, связывающая скорость коррозионного износа с твёрдостью материала, шириной диффузионной зоны и степенью засоленности почвы. Модель была расширена для учёта влияния покрытия TiN и финишного отжига. Расчёты (рис. 5-6) показали, что при оптимальном отжиге скорость коррозии на солончаках (S=1,5%) составляет 22,8 мкм/год, тогда как при неоптимальных режимах (60 и 300 мин) она падает до 3,1 мкм/год, что свидетельствует об отслоении или деградации покрытия TiN.

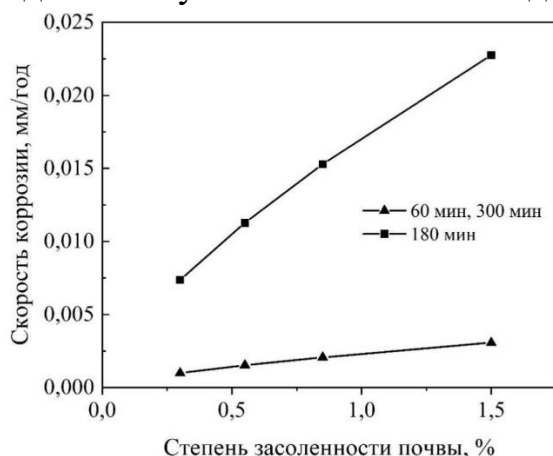


Рисунок 5. – Зависимость скорости коррозионного износа стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием TiN от степени засоленности почвы при различных режимах отжига при 500°C

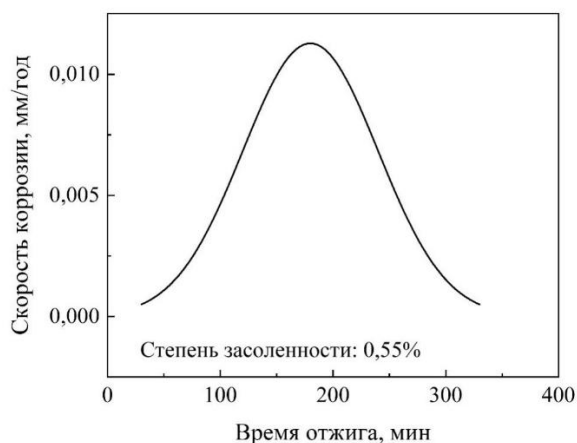


Рисунок 6– Зависимость скорости коррозионного износа стали Л53 с наплавкой Сормайта и покрытием TiN от времени финишного отжига при 500°C

Завершающим и наиболее значимым этапом стали полевые испытания на опытном поле в Краснодарском крае. Испытания проводились на тракторе

МТЗ-82 с плугом ПЛН-3-35 на серой лесной почве (плотность 1,45 г/см³, влажность 22%). В качестве эталона использовался серийный лемех из стали 65Г. Методика основана на высокоточном измерении потери массы с применением адаптированной методики Тикалова–Ефремова, где базовой единицей является обработанная площадь в гектарах. Интенсивность изнашивания (J_j) и износостойкость (J_s) рассчитывались по формулам (5). Относительная износостойкость определялась как ($ИСо = J_s^{опыт} / J_s^{эталон}$).

Результаты (рис. 5–6) показали, что серийный лемех был списан после 320 га (потеря массы 7,80 г), а опытный — после 1280 га (потеря 4,80 г). Интенсивность изнашивания опытного лемеха составила 0,00375 г/га, что в 6,5 раз ниже, чем у эталона (0,024375 г/га).

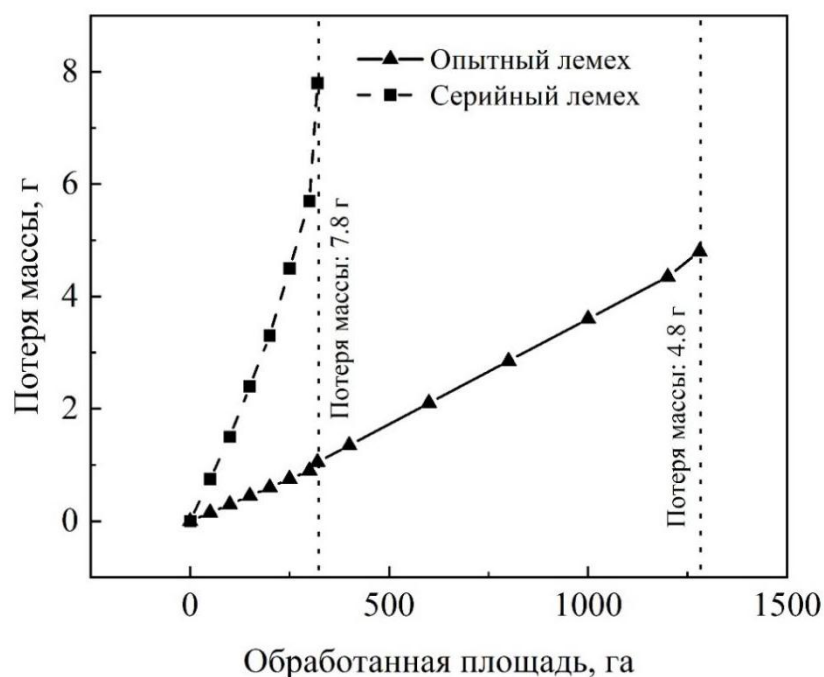


Рисунок 7. – Динамика потери массы лемехов в процессе полевых испытаний

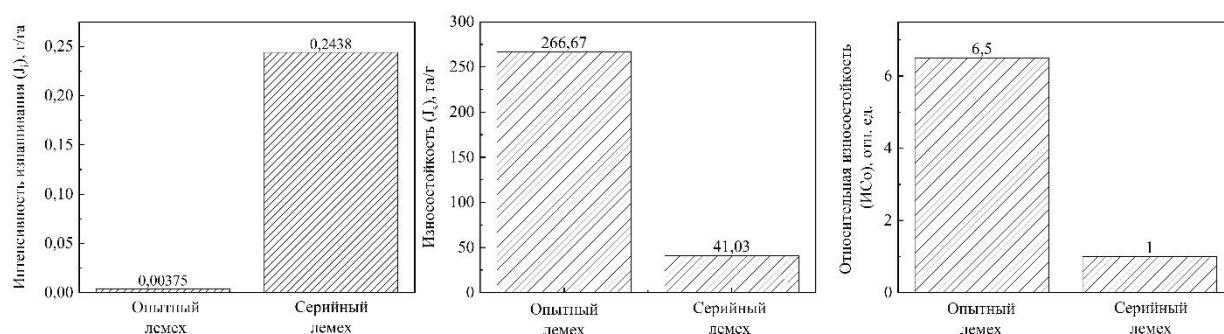


Рисунок 8. – Сравнение характеристик износостойкости

Соответственно, относительная износостойкость достигла значения 6,50. Этот результат превзошёл лабораторные данные (4,0), что объясняется синергетическим эффектом: покрытие TiN снижает тяговое сопротивление на 5%, уменьшает коррозионно-механический износ и повышает сопротивление усталости.

Таким образом, все проведённые исследования — от анализа микроструктуры до полевых испытаний — подтвердили высокую эффективность разработанной технологии. Оптимальным режимом является вакуумный отжиг при 1000°C в течение 180 минут, обеспечивающий формирование однородной диффузионной зоны и максимальную микротвёрдость. Финишный отжиг при 500°C в течение 180 минут критически важен для сохранения целостности и адгезии покрытия TiN. Комплексный подход позволил достичь значительного увеличения ресурса лемехов раз, что подтверждено как лабораторными, так и полевыми данными. Эти результаты создают прочную экспериментальную базу для технико-экономического обоснования, представленного в следующей главе.

В пятой главе «Технико-экономическое обоснование» представлено технико-экономическое обоснование разработанной технологии изготовления плужного лемеха из стали Л53 с комплексным упрочнением, включающим наплавку сплавом Сормайт, вакуумный отжиг, нанесение покрытия TiN методом ионно-плазменного напыления и финишный стабилизирующий отжиг при 500°C. Подробно описан полный технологический цикл: от подготовки заготовки и её очистки до контроля качества готового изделия. Особое внимание уделено выбору оборудования — в том числе вакуумной печи, установки «Булат-300» для нанесения TiN, токарно-фрезерного центра с ЧПУ и сварочного полуавтомата для наплавки. Общие капитальные затраты на оснащение производства составили 15,25 млн рублей. Себестоимость одного упрочнённого лемеха рассчитана в размере 5185,2 рубля, что значительно выше стоимости серийного аналога из стали 65Г (1200 руб.), однако это компенсируется многократным увеличением ресурса.

Эксплуатационные испытания подтвердили, что ресурс модернизированного лемеха достигает 1280 га обработки, что существенно превышает показатели серийных изделий. При этом зафиксировано снижение тягового сопротивления плуга на 5% благодаря низкому коэффициенту трения покрытия TiN. Эти улучшения напрямую транслируются в экономические выгоды: сокращение количества замен лемехов на 58%, снижение простоев техники, уменьшение трудозатрат и логистических расходов. Наиболее значимой статьёй экономии стала экономия топлива — за счёт снижения тягового сопротивления при годовом объёме работ в 960 тыс. га (парк из 1000 плугов) удалось сэкономить 247 619 литров дизельного топлива, что эквивалентно 16,1 млн рублей.

Сводный расчёт годового экономического эффекта для хозяйства с парком 1000 плугов показал, что, несмотря на перерасход средств на закупку более дорогих лемехов (–2,93 млн руб.), совокупная экономия по всем статьям (замены, логистика, топливо) составляет 16,8 млн рублей, что даёт чистый годовой эффект в размере 13,9 млн рублей. Срок окупаемости капитальных вложений при таком масштабе внедрения менее чем за 1,1 года. Таким образом, технология доказала не только техническую состоятельность, но и высокую экономическую эффективность, особенно в условиях крупных

сельхозпредприятий, где эффект масштаба позволяет максимально реализовать потенциал разработанного решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ показал, что эффективность комплексного упрочнения рабочих органов зависит от последовательности технологических операций: наплавка сплава Сормайт на сталь Л53 → вакуумный отжиг при 1000°C в течение 180 минут → нанесение покрытия TiN толщиной 4,0 мкм методом вакуумно-дугового напыления → финишный стабилизирующий отжиг при 500°C в течение 180 минут.

2. Определены оптимальные по критерию формирования однородной диффузионной зоны и сохранения пластичности основного металла параметры вакуумного отжига: температура 1000°C, выдержка 180 минут. При этих условиях достигается толщина диффузионной зоны ~200 мкм, сфероидизация карбидных фаз, дисперсионное упрочнение и повышение микротвердости наплавленного слоя без снижения пластичности основы.

3. Полученные экспериментальные данные позволили установить оптимальные режимы нанесения покрытия TiN: давление в камере 0,5–1,0 Па, температура подложки 200°C, мощность разряда 4 кВт. При данных параметрах обеспечивается прочность сцепления покрытия не менее 450 МПа и коэффициент трения $\leq 0,35$.

4. В результате проведения лабораторных и полевых испытаний установлено, что модифицированные лемехи демонстрируют увеличение износостойкости в 2,5–6,5 раз по сравнению с серийными образцами, повышение коррозионной стойкости на 40–50%, снижение тягового сопротивления плуга на 5%. Результаты подтверждены обработкой более 250 га серой лесной почвы (плотность 1,45 г/см³, влажность 22%) против 40–60 га у стандартных лемехов.

5. Проведенная оценка технико-экономической эффективности технологии показала, что для хозяйства с парком 1000 плугов годовой экономический эффект составляет 13,9 млн рублей за счет снижения затрат на запчасти, экономии топлива (~5%) и сокращения трудозатрат на обслуживание. Капитальные затраты на внедрение окупаются менее чем за 1,1 года.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Бадекин, М. Ю. Микроструктура и эксплуатационные характеристики стали Л-53 после вакуумного отжига / М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько, Н. Н. Ивахненко // Международный технический журнал. – 2025. – № 2(96). – С. 80-90. – DOI 10.34286/2949-4176-2025-96-2-80-90. – EDN ZVVIII.

2. Оптимизация режимов вакуумного отжига для повышения износостойкости лемехов почвообрабатывающих орудий / Н. Н. Ивахненко, М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько [и др.] // Технический сервис машин. – 2025. – Т. 63, № 3. – С. 67-75. – DOI 10.22314/2618-8287-2025-63-3-67-75. – EDN WFGTTP.

3. Физико-математическая модель абразивного износа сормайтовых наплавов после вакуумной термообработки / М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько, В. И. Балабанов, Н. Н. Ивахненко // Наука в центральной России. – 2025. – № 4(76). – С. 139-148. – DOI 10.35887/2305-2538-2025-4-139-148. – EDN RLSJMM.

4. Поверхностное упрочнение лемехов плугов методом вакуумной термообработки / М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько, В. И. Балабанов [и др.] // Наука в центральной России. – 2025. – № 3(75). – С. 125-135. – DOI 10.35887/2305-2538-2025-3-125-135. – EDN MPWRQE.

5. Бадекин М. Ю., Борулько В. Г., Ивахненко Н. Н., Коноплин Н. А. Комплексный анализ диффузионных процессов в системе сталь-сормайт для технологий упрочнения рабочих органов сельхозмашин // Международный технический журнал. 2025. № 3 (97). С. 104–117. EDN: OFKEWG.

Публикации в изданиях, индексируемых в международных цитатно-аналитических базах данных:

6. Ignatenko, P. I. Structure and properties of films grown on Si, Ta, Ti, Mo, W, and Ni substrates by reactive ion-beam sputtering / P. I. Ignatenko, N. A. Klyakhina, M. Yu. Badekin // Inorganic Materials. – 2005. – Vol. 41, No. 2. – P. 148-151. – DOI 10.1007/s10789-005-0034-z. – EDN LQDJEL.

7. Ignatenko, P. I. Structure and properties of metal nitride films produced by ion implantation / P. I. Ignatenko, N. A. Klyakhina, M. Yu. Badekin // Inorganic Materials. – 2005. – Vol. 41, No. 1. – P. 36-41. – DOI 10.1007/s10789-005-0073-5. – EDN HMGRFY.

Публикации в других изданиях:

8. Лавринюк, А. С. Особенности структуры алмазоподобных пленок с нитридом титана / А. С. Лавринюк, М. Ю. Бадекин, Н. Н. Ивахненко // IV Всероссийская научно-практическая конференция "Digital Era", Грозный, 01 марта 2024 года. – Грозный: Чеченский государственный университет имени Ахмата Абдулхамидовича Кадырова, 2024. – С. 31-35. – DOI 10.36684/128-1-2024-31-35. – EDN IRXEVE.

9. Badekin, M. Yu. The influence of vacuum annealing on the strength characteristics of plow shares / M. Yu. Badekin, V. G. Borulko, N. N. Ivakhnenko // Third International Conference on Digital Technologies, Optics, and Materials Science (DTIEE 2024) : Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bukhara, 22–24 мая 2024 года. Vol. 13217. – Washington: SPIE-SOC PHOTO-OPTICAL INSTRUMENTATION ENGINEERS, 2024. – P. 1321703. – DOI 10.1117/12.3035599. – EDN OSKGHF.

Патенты:

10. Патент № 2834102 С1 Российская Федерация, МПК С23С 4/10, С23С 4/137, С23С 14/16. Способ поверхностного упрочнения рабочего органа сельскохозяйственной машины: заявл. 07.05.2024; опубл. 03.02.2025 / М. Ю. Бадекин, В. Г. Борулько, Н. Н. Ивахненко; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева". – EDN ASIEIR.